Kuznecov VON GALILEI BIS EINSTEIN

B. G. Kuznecov

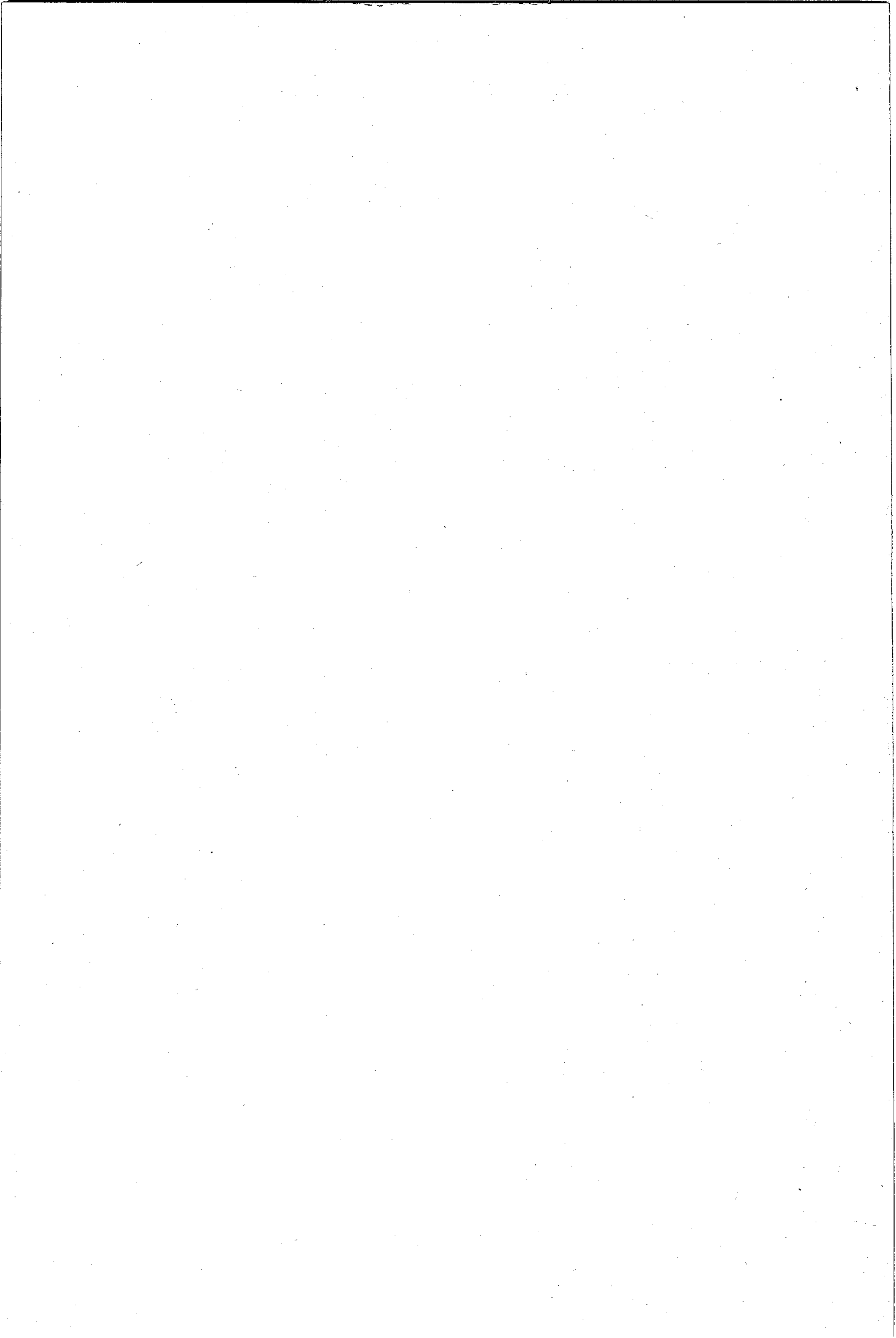
VON GALILEI BIS EINSTEIN

Entwicklung der physikalischen Ideen

Akademie-Verlag · Berlin

B. G. Kuznecov

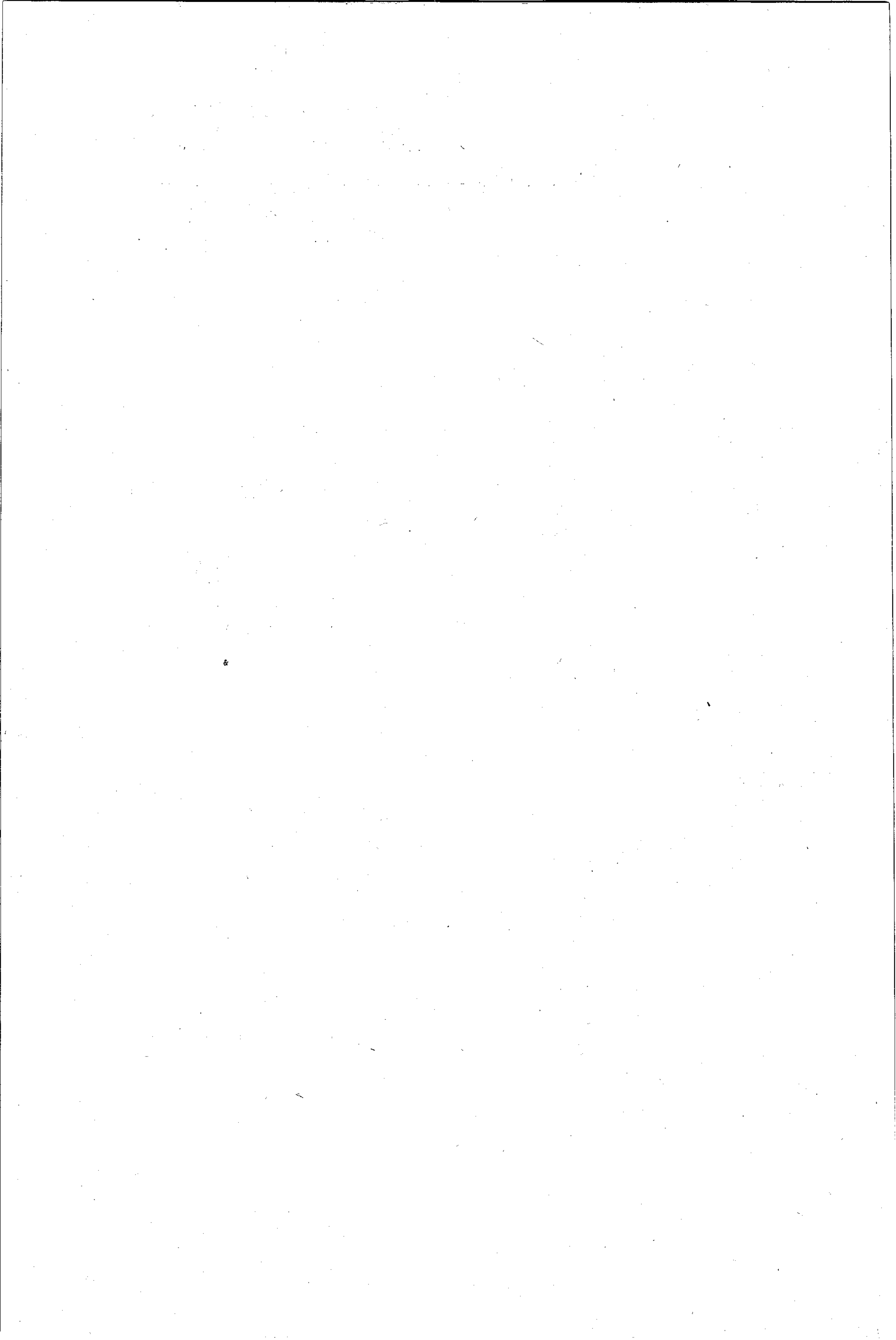
VON GALILEI BIS EINSTEIN



B. G. KUZNECOV

VON GALILEI BIS EINSTEIN

ENTWICKLUNG DER PHYSIKALISCHEN IDEEN



B. G. KUZNECOV

Von Galilei bis Einstein

ENTWICKLUNG DER PHYSIKALISCHEN IDEEN



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN 1970

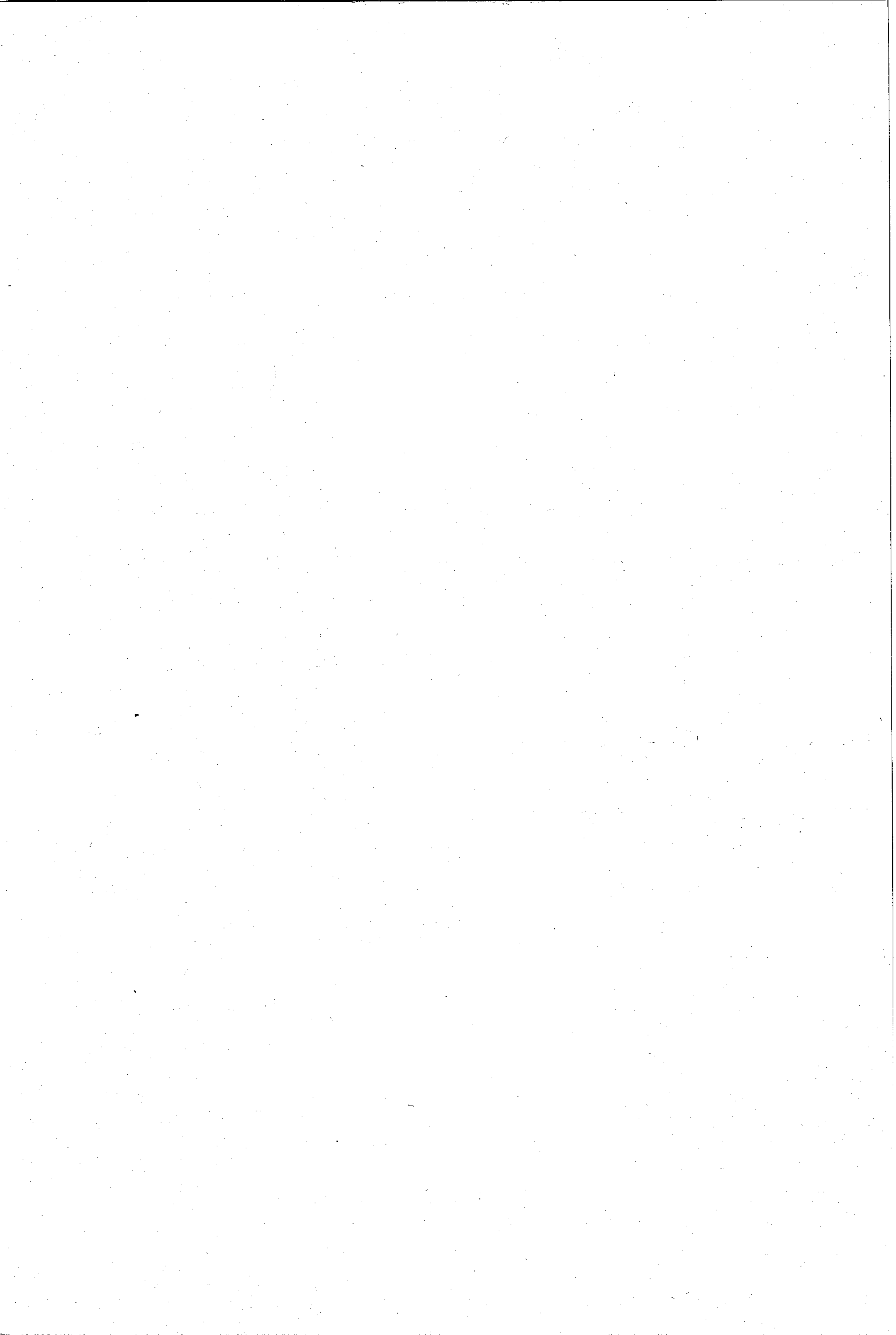
Russischer Originaltext:
Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки, 2-е издание, издательство ,,Наука'', Москва 1966

Herausgeber der deutschen Ausgabe: Gisela Buchheim, Siegfried Wollgast

Erschienen im Akademie-Verlag GmbH, 108 Berlin, Leipziger Str. 3—4

Lizenznummer: 202 · 100/21/70
Schutzumschlag und Einband: Nina Striewski
Herstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki", 74 Altenburg
Bestellnummer: 5711 ES · 3 B 2

INHALTSVERZEICHNIS



VORWORT DER HERAUSGEBER

In letzter Zeit mehren sich auch unter Marxisten die Stimmen, welche die Philosophiegeschichte in Historiographie und Historiologie unterteilen wollen. Der rumänische Wissenschaftler I. Banu sieht den Unterschied zwischen beiden Disziplinen in folgendem[1]: Die Historiographie der Philosophie habe die Vorformen philosophischen Denkens zu erforschen, die Rolle zu bestimmen, die andere Bereiche des gesellschaftlichen Bewußtseins bei der Herausbildung der Philosophie spielen. Sie habe weiter den wechselseitigen Zusammenhang zwischen dem ursprünglichen philosophischen Denken und anderen Formen des gesellschaftlichen Bewußtseins zu untersuchen. Die Historiographie der Philosophie müsse die Hauptthesen eines jeden philosophischen Systems kenntlich machen und interpretieren, Ähnlichkeit und Unterschiede zwischen den philosophischen Systemen explizieren. Zu ihrer Aufgabe gehöre weiterhin die Aufdeckung des Zusammenhangs zwischen logischem (philosophischem) Progreß und historischer Entwicklung der Gesellschaft, der Klassen und sozialen Schichten. Die Historiographie der Philosophie müsse die Konturen des widersprüchlichen Entwicklungsprozesses charakterisieren, der sich in der philosophischen Evolution einer jeden Kulturstufe äußert. Schließlich müsse sie auf der Grundlage dieser Ergebnisse die Hauptetappen dieses Prozesses bestimmen und die Wechselwirkung der verschiedenen philosophischen Prozesse in den einzelnen Kulturen kennzeichnen.

Andere Aufgaben kommen nach Banu der Historiologie der Philosophie zu. Auf der Grundlage historiographischer Forschungen muß sie die allgemeinen Entwicklungsgesetze in der Geschichte der Philosophie herausarbeiten. Davon ausgehend muß sie das Programm der weiteren philosophiegeschichtlichen Forschung bestimmen. Die Historiologie der Philosophie muß die Gesetze aufdecken, welche die allgemeinen Merkmale und spezifischen Besonderheiten in jeder philosophischen Entwicklung bestimmen, eine bestimmte Typologie der allgemeinen philosophischen Entwicklung geben.

Allgemein gesagt ist die Historiologie der Philosophie in dreierlei Hinsicht bedeutsam: Sie leistet 1. „vertikale" Forschungen, welche die Gesetze der philo-

[1] Vgl. Revue Roumaine des sciences sociales (série de philosophie et logique) tome 11, 1967, Nr. 3. Eine gekürzte Fassung des Artikels von И. Бану, Историология Философии, erschien in: Вопросы Философии, Heft 5, 1968, S. 145–152.

sophischen Entwicklung in ihrer zeitlichen Aufeinanderfolge erklären; sie bietet 2. „horizontale“ Forschungen, welche die Gesetze der Wechselwirkung von Ähnlichkeit und Unterschied in philosophischen Systemen verdeutlichen, und 3. verallgemeinert und systematisiert sie die auf diesem Wege gewonnenen theoretischen Resultate.

Uns scheint diese — hier nur grob skizzierte — Unterscheidung von Historiographie und Historiologie der Philosophie als methodologisches Prinzip sehr sinnvoll und geeignet. Die marxistische Philosophiegeschichte muß natürlich beide Richtungen pflegen. Für die bürgerlichen Philosophiehistoriker war und ist nach dieser Gliederung zumeist die Historiographie entscheidend. Auf ihre vielfältigen Einzeluntersuchungen kann sich die marxistische Philosophiegeschichte unter Beachtung der für die Historiographie genannten Punkte weitgehend stützen. Sie bleibt aber nicht dabei stehen, sondern schreitet zu historiologischen Lösungen vor, was ihrem Charakter entspricht. Sicherlich wird die weitere Differenzierung der Wissenschaften im allgemeinen und der Philosophie im besonderen auch in der Philosophiegeschichte im Prozeß der gesellschaftlichen Entwicklung eine Unterscheidung und Trennung ihrer persönlichen Repräsentanten — möglicherweise nach Historiographen und Historiologen der Philosophiegeschichte — möglich machen.

Uns scheint weiter, daß die Unterscheidung Banus auch für die Diskussion um die Wissenschaftsgeschichte, ihren Gegenstand und ihre Aufgaben wesentlich ist. Das theoretische Verhalten des Menschen zur Natur findet vor allem in der Geschichte der Naturwissenschaften Widerspiegelung. Will man die Unterscheidung von Historiographie und Historiologie auf die marxistische Wissenschaftsgeschichte in der Deutschen Demokratischen Republik anwenden, so wird man feststellen, daß die erschienenen Arbeiten zumeist historiographischer Natur, vorwiegend empirisch beschreibend sind. Dies ist zwar eine Wertung, keineswegs aber eine Abwertung. Viele Mosaiksteine für das Gesamtbild einer marxistischen Wissenschaftsgeschichte müssen gesetzt, viele subtile Einzeluntersuchungen in mühevoller Kleinarbeit angefertigt werden, bevor man aus diesem Mosaik ein die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Wissenschaftsgeschichte erfassendes Gesamtbild erarbeiten kann.

Verfolgt man Gesetzmäßigkeiten der Wissenschaftsgeschichte in einer größeren Periode oder sucht man beherrschende Leitideen für die Entwicklung der gesamten modernen Naturwissenschaft zu verdeutlichen, so ist die enge Beziehung zur Philosophie eine Conditio sine qua non. In hervorragender Weise hat dies John D. Bernal in seiner „Wissenschaft in der Geschichte“ demonstriert. Nicht weniger exzellent zeigt dies „historiologisch“ unser Autor.

Prof. Boris Grigor'evič Kuznecov wurde am 5. Oktober 1903 in Dnepropetrovsk (früher Jekatarinoslav) geboren. Mit achtzehn Jahren begann er seine pädagogische Tätigkeit. Seit 1933 arbeitet er wissenschaftlich an der Akademie der Wissenschaften der UdSSR. Seit 1944 ist er am Institut für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik dieser Akademie tätig. Im Jahre 1960 wurde er zum korrespondierenden, 1961 zum ordentlichen Mitglied der Internationalen Akademie der Geschichte der Wissenschaften gewählt.

Schon in den dreißiger Jahren erregte Kuznecov mit der Entwicklung eines Schemas für ein einheitliches Hochspannungsverbundnetz der UdSSR Aufmerksamkeit.[2] Nach mehreren Arbeiten zur Geschichte der Energetik und zu deren physikalischen und technisch-wissenschaftlichen Grundlagen[3] wandte sich Kuznecov in den vierziger Jahren gänzlich Arbeiten zur Geschichte der Physik zu. In den Jahren von 1945 bis 1954 erschienen dazu von ihm einige Bücher[4] sowie Studien zu Leonhard Euler, Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz. Im Jahre 1954 erschien eine Lomonossov-Biographie.

Seit Mitte der 50er Jahre analysiert B. G. Kuznecov in wachsendem Maße das Vergangene vom Standpunkt der modernen Wissenschaft. Im Vergangenen werden dabei nicht nur und keineswegs hauptsächlich die positiven „Lösungen" betrachtet, sondern vor allem die Probleme, die in ihrer Zeit nicht gelöst werden konnten. Es handelt sich dabei also nicht um eine Annäherung der Ideen des Vergangenen an das Gegenwärtige, sondern um die Klärung, welches *der Zukunft* gestellte Problem bereits in der alten Theorie vorhanden war. In diesem Sinne ist gerade das letzte Kapitel des vorliegenden Buches das Ergebnis eingehender historischer Untersuchungen sowie wohldurchdachter und wohlbegründeter Gegenüberstellungen, zugleich aber auch ein umfangreiches Programm für weitere Forschungen.

Kuznecov meint, daß die Analyse vergangener historischer Ideen von modernen Gesichtspunkten aus es gestattet, in der Wissenschaft der Vergangenheit — auch der Antike — neue Züge, neue Probleme, neue Keimzellen künftiger Wissenschaftsrichtungen zu erkennen. Je weiter die Wissenschaft voranschreitet, um so reichhaltiger wird das wissenschaftliche Erbe. Je entschiedener die moderne Wissenschaft ihre eigenen Auffassungen überprüft, um so weiter greift die Neueinschätzung der historischen Wertungen um Jahrhunderte zurück.

In Kuznecovs Arbeiten äußert sich unseres Erachtens eine objektive Forderung der Gegenwart: Es muß unbedingt Werke geben, die explizit die Abhängigkeit historischer Einschätzungen von den modernen Tendenzen der Wissenschaft, von ihrem Zustand in der Mitte unseres Jahrhunderts ausdrücken, die Kontinuität in der Diskontinuität der Wissenschaftsentwicklung. In diesem Sinne übergeben wir die deutsche Übersetzung der Arbeit von Prof. B. G. Kuznecov.[5]

Die Übersetzung der Kapitel I bis III besorgte Dr. habil. S. Wollgast, der Kapitel IV bis VII Dr. G. Buchheim und der Kapitel VIII bis X Dr. W. Krah.

[2] Б. Г. Кузнецов, Единая высоковольтная сеть, Москва 1931.

[3] Vgl. Б. Г. Кузнецов, Очерки по истории электротехники, Москва 1936; История энергической техники, Москва 1937.

[4] Vgl. u. a.: Б. Г. Кузнецов. Ломоносов, Лобачевский, Менделеев – очерки жизни и мировозрения, Москва-Ленинград 1945.

[5] In deutscher Sprache erschienen bisher folgende Arbeiten von B. G. Kuznecov: Die Lehre des Aristoteles von der relativen und der absoluten Bewegung im Lichte der modernen Physik, in: Sowjetische Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaft, hrsg. v. G. Harig, Berlin 1960, S. 27–61; Moderne Logik, Physik und Geschichte der Physik, in: Beiheft zur NTM, Leipzig 1964, S. 131–136.

Für die deutsche Ausgabe wurde der Text des Originals mit den ihr vom Autor beigegebenen Teilen aus anderen Arbeiten geringfügig gekürzt. Schreibweise und Interpunktion der Zitate wurden weitgehend modernisiert.

Dresden, im Februar 1969

Gisela Buchheim
Siegfried Wollgast

VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE

Es ist eine große Freude für mich, daß dieses Buch in deutscher Sprache erscheint. Entgegen dem italienischen Sprichwort „traduttore — traditore" ermöglicht es eine Übersetzung vielfach, den Gedankengang des Autors besser auszudrücken und den semantischen Gehalt zu erweitern. In vielen Büchern begegnet man Begriffen, die sehr adäquate lexikalische Äquivalente im Wortbestand der Sprache haben, in die das jeweilige Buch übersetzt wurde. In dieser Hinsicht ist die deutsche Sprache für wissenschaftshistorische Untersuchungen, die sich mit der Entwicklung der allgemeinsten Prinzipien der Physik beschäftigen, von besonderer Bedeutung. Denn in der deutschen Sprache wurden viele grundlegende physikalische und philosophische Begriffe erstmalig geäußert oder sie diente als eine der Quellen dieser Begriffe.

Schon vor zwanzig Jahren hatte ich die Absicht, eine historische Analyse der klassischen Physik, ausgehend von einer quantentheoretisch-relativistischen Position, vorzunehmen. In den fünfziger Jahren konnte ich mein Vorhaben in Form einer Trilogie verwirklichen.[1] Das vorliegende Buch basiert auf dieser Trilogie, enthält aber eine Fülle neuer Einschätzungen und Verallgemeinerungen.

Zunächst einige Worte über die Bedeutung einer historischen Analyse der klassischen Wissenschaft unter nichtklassischen Gesichtspunkten.

Je deutlicher sich die gegenwärtig noch ungelösten Probleme der theoretischen Physik abzeichnen, um so mehr werden ihre Verbindungen mit der Vergangenheit sichtbar, um so häufiger erinnert sich die Wissenschaft an frühere Auseinandersetzungen über Raum, Zeit, Bewegung und Stoff. Die bei der Lösung physikalischer Probleme immer wieder auftretenden Schwierigkeiten lassen auf Veränderungen schließen, die wahrscheinlich zu einer noch entschiedeneren Abkehr von der mechanischen Weltanschauung führen werden, als das in der Relativitätstheorie und in der Quantentheorie der Fall war. An der Schwelle neuer Erkenntnisse blickt die Wissenschaft zurück, überdenkt sie Inhalt und Bedeutung altgewohnter feststehender Begriffe.

Diese Begriffe erweisen sich als historisch bedingt. Ihre Entwicklung verdeutlicht die ständig wachsende Übereinstimmung des wissenschaftlichen Weltbildes

[1] Б. Г. Кузнецов, Развитие научной картины мира в физике XVII–XVIII вв., Москва 1955; Б. Г. Кузнецов, Принципы классической физики, Москва 1958; Б. Г. Кузнецов, Основы относительности и квантовой механики в их историческом развитии, Москва 1957.

mit der objektiven Realität. Die heutige Physik sucht nach einer Synthese zwischen den Vorstellungen über Relativität und Kontinuität des Raumes und der Zeit einerseits und den atomistischen Konzeptionen andererseits, von Ideen also, die bereits seit der Herausbildung eines wissenschaftlichen Weltbildes existieren. Wie es scheint, wird das fundamentalste Prinzip der klassischen Wissenschaft zum Objekt der historischen Rückschau, nämlich die Vorstellung über die mit sich selbst identischen Teilchen, die sich im kontinuierlichen Raume bewegen. Die Relativitätstheorie widerlegte die Vorstellungen von der Unabhängigkeit von Raum und Zeit, von der Unveränderlichkeit der Masse und schließlich 1916 vom Unterschied zwischen der Inertialbewegung und der Beschleunigung im Gravitationsfeld. Die spezielle Relativitätstheorie hat eine der wesentlichsten Annahmen der klassischen Physik zu einer Annäherung abgewertet und somit zum Objekt historischer Analysen gemacht. Nach letzterer sind alle mechanischen Inertialsysteme gleichberechtigt, aber ihnen steht das privilegierte System des Weltäthers gegenüber. Bezogen auf dieses System, bewegen sich die Körper mit ihrer „wahren" Geschwindigkeit. 1905 wurde klar, daß die Geschwindigkeit relativ zum Äther ein inhaltloser Begriff ist, daß sich die räumlichen und zeitlichen Intervalle in einem bewegenden System ändern, daß die Lichtgeschwindigkeit beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen konstant bleibt, wobei der Zeitverlauf nur für ein gegebenes System einen bestimmten Sinn hat. So ist es sinnlos, von einer einheitlichen Zeit für verschiedene Systeme zu sprechen, wenn die Aufgabe nicht eine angenäherte Vorstellung von einer unendlich großen Lichtgeschwindigkeit zuläßt. Eine für das ganze Weltall einheitliche Zeit — als lineare Funktion der Koordinaten von Körpern, die sich entsprechend der Trägheit bewegen — wurde zum angenäherten Begriff, der nur für einen bestimmten Kreis von Aufgaben geeignet ist.

Bei dem durch die spezielle Relativitätstheorie verursachten Umbruch blieb die Grundlage des klassischen Weltbildes erhalten, die Vorstellung von absolut mit sich selbst identischen diskreten Körpern, die sich relativ zueinander bewegen.

Noch grundsätzlichere Veränderungen brachte die allgemeine Relativitätstheorie. Sie hob die Gegenüberstellung der Bewegung im Gravitationsfeld und der Inertialbewegung auf. Wenn die klassische Mechanik annahm, daß die Körper sich bei fehlendem Kraftfeld entlang geraden Weltlinien bewegen (d. h. entlang den kürzesten Linien in der euklidischen Geometrie), so behauptet die allgemeine Relativitätstheorie, daß sich die Körper im Gravitationsfeld entlang gekrümmten, geodätischen Linien bewegen. Allgemeiner ausgedrückt: Das Gravitationsfeld stellt lediglich eine Abweichung von den euklidischen Beziehungen im vierdimensionalen, räumlich-zeitlichen Kontinuum dar, die Krümmung dieses Kontinuums. Das Feld löst sich mit bestimmten von der Massenanhäufung abhängigen geometrischen Eigenschaften in Raum und Zeit auf.

Allerdings greift auch die allgemeine Relativitätstheorie die Vorstellung von der kontinuierlichen Bewegung der mit sich selbst identischen Teilchen nicht an.

Die Gesetze, die die Bewegung eines solchen Teilchens bestimmen, sind als Differentialgesetze formuliert, die das Verhalten eines Teilchens in einem ge-

gebenen Punkte und in einem gegebenen Moment mit seinem Verhalten in jedem folgenden Moment verbinden. Wenn ein Gesetz gegeben ist, das das Verhalten eines Teilchens oder eines Systems von Teilchen in jedem folgenden Moment definiert, und wenn es kontinuierlich wirkt, so können wir schlußfolgern daß die sich bewegenden Teilchen mit sich selbst identisch sind.

Die Mitte der 20er Jahre unseres Jahrhunderts entstandene Quantenmechanik begrenzte die Vorstellung über ein mit sich selbst identisches Teilchen, dessen gegebener Zustand jeden folgenden nach einem Differentialgesetz bestimmt. Bei der Bewegung eines Elementarteilchens ist nur die Wahrscheinlichkeit des Aufenthaltes an jedem Punkte seiner Bahn mit unbegrenzter Genauigkeit eindeutig bestimmbar. Auch die Geschwindigkeit des Teilchens in jedem Punkte kann nicht unter beliebigen Bedingungen mit unbegrenzter Genauigkeit bestimmt werden.

Die relativistische Quantenmechanik, die Quantenelektrodynamik und die experimentellen Entdeckungen der Entstehung und Vernichtung und überhaupt der Transmutation von Elementarteilchen erschütterten schließlich dieses Postulat der klassischen Physik. Die klassische Physik begann historisch und logisch damit, daß sie der aristotelischen qualitativen Veränderung die räumliche Verschiebung materieller Teilchen gegenüberstellte. Bewegt sich das Teilchen, so verändert sich seine Lage, aber es bleibt mit sich selbst identisch, es verwandelt sich nicht in ein anderes Teilchen. Qualitative Transmutationen der Elementarteilchen sind in der klassischen Physik ausgeschlossen. Qualitative Veränderungen werden auf Veränderungen der Konfiguration des Systems, d. h. auf Bewegung der mit sich selbst identischen Teilchen, zurückgeführt.

Dieses klassische Postulat wurde erst in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erschüttert. Einige Richtungen der Physik führten zu Vorstellungen über sich bewegende Teilchen als Elemente eines kontinuierlichen Mediums, aber sie rührten nicht unmittelbar an die Vorstellung von der Identität des Teilchens mit sich selbst. In der Quantenmechanik wurde, ungeachtet ihrer prinzipiellen Ablehnung einer Identität des Quantenobjektes mit dem klassischen Teilchen, das gleichermaßen genaue Werte für seinen Impuls und seine Koordination besitzt, die Existenz von Korpuskeln angenommen. Sie wies allerdings auf die Ungenauigkeit der klassischen Analogie hin. Die heutige Quantenmechanik grenzt die klassische Vorstellung über die Identität eines Teilchens mit sich selbst ein, aber sie leitet sie nicht aus einer allgemeineren nichtklassischen Theorie ab. Eine solche allgemeinere nichtklassische Theorie ist noch nicht geschaffen, aber ihre sich noch unklar und unbestimmt abzeichnenden Konturen erlauben bereits, die physikalischen Konzeptionen der Vergangenheit auf neue Art zu bewerten.

Wir verfolgen in diesem Buche die Entwicklung bedeutender physikalischer Ideen vom 17. bis zum 20. Jahrhundert, ausgehend von bestimmten gegenwärtigen Tendenzen, die sich noch nicht voll herauskristallisiert haben, noch nicht in den Rang eindeutiger Theorien erhoben wurden, die aber bereits eine neue Betrachtungsweise des Vergangenen fordern. Es geht um eine neuere Auffassung des mechanischen Weltbildes, eine neue Beurteilung der cartesischen Physik, der Newtonschen Dynamik, eine neue Erörterung der Prinzipien der Einheitlichkeit von Raum und Zeit, der Erhaltung, der Irreversibilität, der Nahwirkung und

schließlich der historisch-wissenschaftlichen Charakteristik der Relativitätstheorie und der Quantentheorie, ausgehend von einer allgemeineren, quantentheoretisch-relativistischen Konzeption.

Eine solche Betrachtungsweise könnte gewisse Zweifel hervorrufen. Kann man Tendenzen, die noch keine entsprechende Gesetzform erhalten haben, zur Grundlage einer Neubewertung historischer Errungenschaften machen? Wenn wir diese Tendenzen in den Begriff der „modernen Physik" einbeziehen, so wird es im folgenden nicht leicht sein, eine feste Position zu finden, von der es möglich ist, die Entwicklung eines wissenschaftlichen Gedankens mehr oder weniger eindeutig zu beurteilen. Noch niemals war in der Physik ein so starkes Vorgefühl nahender grundlegender Veränderungen zu spüren, noch niemals wurden in so breitem Maße Methoden „auf Kredit" angewendet, darauf rechnend, daß eine zukünftige Theorie die notwendige Fundierung dieser Methoden geben wird. Hat es einen Sinn, einen solchen Kredit für die historische Analyse auszunutzen? Es ist schwierig, auf diese Frage a priori zu antworten. In den einleitenden Bemerkungen kann nur die Möglichkeit einer gewissen Umbewertung des Vergangenen angedeutet werden, die mit dem Übergangscharakter der heutigen Position der Physik verbunden ist. Vor einigen Jahren bezeichnete Niels Bohr die Spintheorie Heisenbergs, einen Versuch, die Theorie des Feldes zu verallgemeinern, als zweifellos verrückt, bezweifelte aber, ob sie verrückt genug sei, um richtig zu sein.

Damit ist eine sehr treffende Charakteristik der heutigen Situation gegeben, in der es sehr schwer ist, irgend etwas Unbestreitbares über die weiteren Wege der Wissenschaft zu sagen, in der aber ohne Zweifel feststeht, daß die kommende Veränderung eine grundlegendere Abkehr von den klassischen Positionen bringen wird, als das die physikalischen Theorien in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts mit sich gebracht haben. Diese „Verrücktheit" vom Standpunkt der klassischen Position aus unterscheidet sich von den Paradoxa der Physik der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts. Einstein schrieb dem vierdimensionalen „Raum" und den Paradoxa der nichteuklidischen Geometrie einen physikalischen Sinn zu. Bohr und Heisenberg gaben einem anderen Paradoxon einen nicht mehr geometrischen, sondern eher logisch-physikalischen Sinn. Man kann im allgemeinen nicht sagen, ob sich ein Teilchen im gegebenen Moment an einem gegebenen Punkte befindet oder nicht. Ein solches Paradoxon widerspricht dem Prinzip des ausgeschlossenen Dritten der klassischen Logik. Die neuen Paradoxa der Physik berühren die grundlegenden Korrelationen der Logik und der Mathematik. Diese Beziehungen erhalten einen physikalischen Sinn, wenn die Wissenschaft eine Verbindung zwischen der Existenz nichtidentischer physikalischer Objekte und der kontinuierlichen Bewegung mit sich selbst identischen Teilchen findet.

Ein solcher Vergleich der gegenwärtigen mit den vergangenen Tendenzen in der Wissenschaft läßt vor allem die „nichtklassischen" Seiten der klassischen Wissenschaft hervortreten: ihre Widersprüche, ihr Suchen, ihre nichtgelösten an die Zukunft adressierten Probleme. Das gilt bereits für Galilei. Seine Weltanschauung wie auch die gesamte Wissenschaft des 17. Jahrhunderts ist lebendig, durchaus nicht erstarrt, mit einer Vielfalt von Schattierungen und Übergängen, mit ihrem Suchen und ihren ungelösten Problemen. Aber diese lebendigen, unermüd-

lich suchenden Gedanken sind auch für die Wissenschaft des 18. Jahrhunderts charakteristisch, ungeachtet all ihrer rationalistischen Ordnungssuche und des erstarrenden Bildes einer unbeweglichen oder sich laufend wiederholenden Natur. Sie sind auch typisch für Newton, der für einen Apostel ewig geltender Dogmen gehalten wurde und es im gewissen Maße auch für die gesamte Entwicklung der klassischen Physik war. Will man diese Seiten der klassischen Physik klar herausarbeiten, kann man sich nicht mit der Aufzählung positiver Antworten begnügen. Ihre Geschichte schließt das in sich ein, was Einstein das Drama der Ideen nannte und was er in der Entwicklung der Wissenschaft vor allem suchte: die nicht verschwindenden, immer und immer wieder vor der Wissenschaft auftauchenden „verfluchten Fragen", deren Lösungen niemals endgültig sind, die die Wissenschaft aber immer mehr der absoluten Wahrheit nähern.

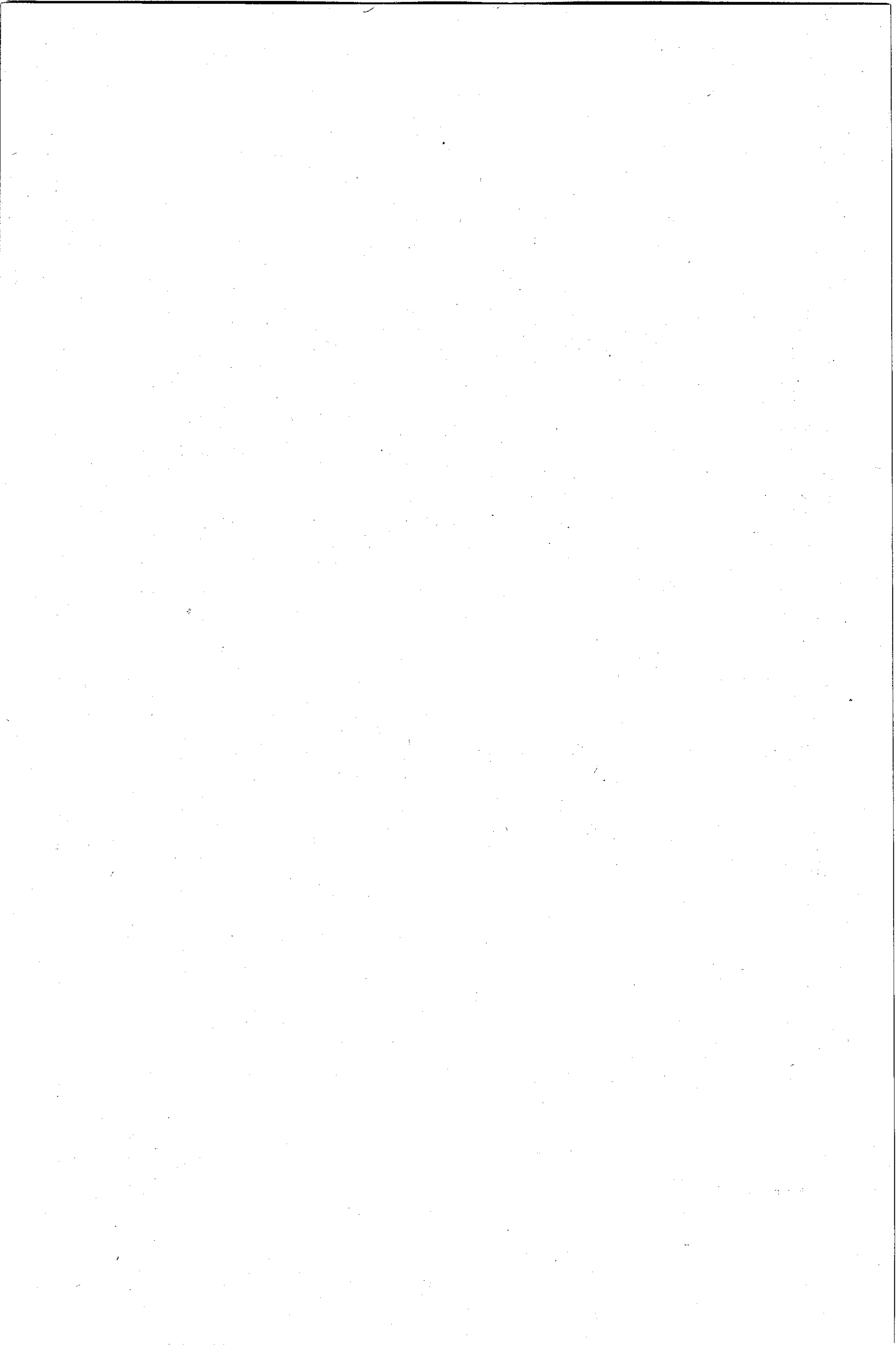
Die erste russische Ausgabe dieses Buches erschien im Jahre 1963, die zweite verbesserte 1966. In diese Arbeit wurden auch Ergebnisse anderer Veröffentlichungen des Autors einbezogen.[2] In die deutsche Ausgabe wurde ein Abschnitt über Elementarteilchen aufgenommen, dem das Buch „Очерки физической атомистики XX века" (Moskau 1966) zugrunde liegt.

Ich danke Frau Dr. Gisela Buchheim und Herrn Dr. habil. Siegfried Wollgast von der Sektion Philosophie und Kulturwissenschaften der Technischen Universität Dresden sowie dem Akademie-Verlag Berlin dafür, daß sie mein Buch in deutscher Sprache herausgeben. Mit noch größerer Freude erfüllt mich die Möglichkeit, auf diese Weise mit den deutschen Lesern, besonders mit der studierenden Jugend, in Kontakt zu kommen.

Moskau, im Dezember 1968

B. G. Kuznecov

[2] Besonders: Б. Г. Кузнецов, Зволюция картины мира, Москва 1961.



I. HELIOZENTRISMUS UND BEGINN DES MECHANISCHEN WELTBILDES

1. Die Wissenschaft des 17. Jahrhunderts und ihre historischen Quellen

Zu Beginn des 17. Jahrhunderts vermittelte die Naturwissenschaft nicht nur wahre, der objektiven Wirklichkeit entsprechende astronomische, physikalische, chemische, geologische und biologische Einzelergebnisse, sondern auch ein verhältnismäßig umfassendes wissenschaftliches Gesamtbild des Weltgebäudes. Die historische Entwicklung modifiziert dieses Bild und betont gleichzeitig seine Grundgedanken — die Auffassung von der Unendlichkeit, Homogenität und vom isotropen Charakter des Raumes.

Schon in der voraufgegangenen Periode hatten sich heliozentrische Vorstellungen über das Sonnensystem herausgebildet. Sie vermochten zwar präzisiert, aber noch nicht auf ihre Grundlagen hin überprüft zu werden. Damit lag noch kein allgemeines Weltbild vor, das die gesamte Natur erfaßt, alle naturwissenschaftlichen Kenntnisse verallgemeinert hätte. Bedingung eines solchen Weltbildes war die Vereinigung der heliozentrischen Astronomie mit der Mechanik irdischer Körper. Im Ergebnis dieser Vereinigung bildete sich die Vorstellung von Gesetzen der Mechanik heraus, die alle Naturerscheinungen lenken. Später erwies sich, daß kompliziertere Gesetzmäßigkeiten der physikalischen und vor allem der chemischen und biologischen Erscheinungen auf diese Gesetze nicht zu reduzieren waren. Das mechanische Weltbild wurde in der Folgezeit exakt und farbenreich, verdeutlichte die spezifischen Züge einzelner Erscheinungsbereiche und den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Disziplinen. Der Grundstein für die kontinuierliche Entwicklung des Weltbildes und für die Anhäufung zuverlässiger Kenntnisse wurde im 17. Jahrhundert gelegt.

In der Periode vor dem 17. Jahrhundert wurden für die Naturwissenschaften die Ende des 15. Jahrhunderts beginnenden technischen Umwälzungen, die großen geographischen Entdeckungen, der Welthandel, die Entwicklung der Architektur, die Befestigungskunst, der Schiffbau, der Bau von Hafenanlagen, Wegen und Kanälen zu entscheidenden Triebkräften. Weitere Triebkraft der Naturwissenschaft war der Kampf der neuen Gesellschaftsklassen gegen die politischen und kulturellen Erscheinungen des Feudalismus, der sich aus der Reformation und der in ihr vollzogenen Brechung der geistigen Diktatur der Kirche ergab.

Im mittelalterlichen Handwerk hatten sich in den letzten Jahrzehnten des 15. Jahrhunderts bedeutsame technische Umwälzungen vollzogen. Sie waren nicht von so unmittelbarem Einfluß auf den Charakter der wissenschaftlichen Vorstellungen wie die Manufaktur vom 16. bis zum 18. Jahrhundert, weil die

Produktion zu dieser Zeit noch nicht in einzelne technologische Operationen aufgegliedert war. Aber die technischen Wandlungen im mittelalterlichen Handwerk bereiteten eine solche Aufgliederung vor. Gleichzeitig ermöglichten sie die Anhäufung von Kenntnissen über physikalische und chemische Prozesse, die jedoch noch der theoretischen Deutung bedurften.

Die großen geographischen Entdeckungen brachten eine gigantische Ausweitung der empirischen Grundlage der Naturvorstellungen. Schon früher hatten die Europäer viele technologische Verfahren und Ergebnisse übernommen, die im Osten erarbeitet worden waren. Nunmehr eigneten sie sich durch ihre Reisen eine Vielzahl neuer geographischer, geologischer, physikalischer, chemischer und biologischer Kenntnisse an. Diese ließen sich nicht in den überkommenen Rahmen der mittelalterlichen Scholastik einfügen.

Die großen geographischen Entdeckungen und der Seehandel gaben den Impuls für die Manufakturproduktion. Mit dem Seehandel stand der Schiffbau in unmittelbarem Zusammenhang. Die Bedingungen des See- und später des Ozeantransportes veränderten sich ständig. Sie erforderten eine verhältnismäßig rasche Einführung neuer Schiffstypen. Der technische Fortschritt erfolgte so schnell, daß neben der empirischen Schiffbautechnik eine entsprechende Theorie notwendige Entwicklungsbedingung des Handels und Transports wurde. Bald erschienen technische Arbeiten über den Schiffbau, die auf den Gesetzen der Mechanik basierten.

Die Schiffahrt erforderte auch die Konstruktion neuer physikalischer Geräte: Fernrohre und Sextanten wurden erstmals auf Schiffen angewendet. Uhren wurden zu einem wichtigen Navigationsinstrument. Die Herstellung von Uhren, der ersten automatischen Geräte, wurde zu einer Schule für komplizierte Verfahren der technischen Mechanik.

Die Erfordernisse des Handels verlangten in Europa neue Transportformen, besonders die Errichtung von Schleusen und Kanälen. Neue Zweige der Baumechanik wurden geschaffen. Ihr ältester Bereich war die Baukunst. Seit dem Altertum diente sie als praktische Grundlage der Statik.

Auch im Mittelalter wurden Architektur, Befestigungswesen und Schiffbau entwickelt, Häfen, Straßen und Kanäle gebaut. Das frühe Mittelalter kannte jedoch nicht die Manufakturproduktion. Deren Entwicklung erklärt viele Wesensmerkmale der Wissenschaft im 17. und 18. Jahrhundert.

Für die Mechanik war die sporadische Anwendung von Maschinen in der Manufakturproduktion von großer Bedeutung. Weit verbreitet waren Mechanismen, die auf den zu bearbeitenden Gegenstand durch Druck bei einer Kreisbewegung oder einer periodisch schwingenden Bewegung ihrer Teile wirkten: Pressen zur Weinbereitung, Appreturmaschinen in der Textilindustrie, Walzwerke und Stauchmaschinen bei der Metallbearbeitung. Es wurden auch Hämmer verwendet, die durch Nockenwellen betrieben wurden. Außerdem fanden Gebläse, Bohrmaschinen, Maschinen zum Zerschneiden von Draht, Schleifmaschinen usw. Anwendung. Neben dem traditionellen Zahnradantrieb kannte das späte Mittelalter den Seil- und Riemenantrieb. Er setzte eine unvergleichlich größere Zahl von Maschinen in Bewegung als die Transmissionen des Altertums. Gleichzeitig

damit wurden immer häufiger schon dem Altertum bekannte einfache Maschinen verwendet. Hebel, Rollen, Schrauben, schiefe Ebenen und verschiedene Verbindungen dieser Elemente wurden benutzt. Auf Bauplätzen, in Arsenalen, beim Bergbau, in Werften und Manufakturunternehmungen des 17. Jahrhunderts finden sich Flaschenzüge, verschiedene Kombinationen von Rollen und andere Mechanismen. Ihre Bedienung erforderte gewisse Kenntnisse in der Theorie einfacher Maschinen.

Will man den technischen Fortschritt im 17. Jahrhundert in seinem Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaft einschätzen, so muß vor allem die Energetik der großen Manufakturwerkstätten, der Werften, der Bergwerke und metallurgischen Fabriken behandelt werden.

Im 16. Jahrhundert äußerte sich der technische Fortschritt vorwiegend in der umfassenden Anwendung der Ende des 15. Jahrhunderts erarbeiteten Prinzipien. Die Entwicklung der Technik führte zu einer Vergrößerung der Werkstätten, der Werften und Bergwerksunternehmen sowie zur Notwendigkeit neuer Energiequellen. In großem Maße wurde das Wasser als Antriebskraft verwandt. Hier liegt der Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer mechanischer Kenntnisse.

Als Beispiel mag der Bergbau dienen. Das 17. Jahrhundert behielt den größten Teil der bereits Georgius Agricola bekannten Konstruktionen bei, aber in der Bergwerksmechanik wurden gegenüber dem 15. und 16. Jahrhundert bei weitem mehr Verfahren zur Erzgewinnung, zum Auspumpen des Wassers usw. eingeführt. Im wachsenden Maße überzeugten sich die Bergwerksmechaniker von der Unmöglichkeit, das Wasser mit Hilfe von über der Erde stationierten Pumpen aus sehr großer Tiefe zu heben, und gelangten zu weiteren Problemen der Hydromechanik. Im Bergbau beschäftigte man sich auch erstmalig mit Problemen der Ventilation. Dies führte zur theoretischen Untersuchung der Dynamik der Luftströme.

In der Metallurgie des 17. Jahrhunderts erhielten die schon im 15. Jahrhundert entwickelten Konstruktionen und Verfahren eine breite Anwendung in neuen metallurgischen Bereichen. Die Produktion von Roheisen und Gußeisen sowie die Aufbereitung von Gußeisen gewann besonders in Deutschland, Italien, Schweden, Frankreich, Rußland und England immer mehr an Bedeutung. In diesen Ländern wurden Produktionsstätten errichtet, die täglich mehrere Tonnen Metall lieferten. Unternehmen von dieser Größe wurden vor allem im Bereich der Aufbereitung der Erze und der Verarbeitung des Eisens benötigt. Bei der Produktion von Frischeisen waren neue Konstruktionen zur Verarbeitung der Luppen erforderlich. Das 17. Jahrhundert ist durch die schnelle Entwicklung und umfassende Anwendung großer Hämmer, die durch Wasserräder in Bewegung gesetzt werden, gekennzeichnet. Die Konzentration der handwerklichen Instrumente in verhältnismäßig großen Unternehmen und die gewaltigen Ausmaße der Aggregate in Bergbau und Metallurgie führten zur Schaffung mächtiger Antriebskräfte. Das Wasserrad wurde wichtigster Energielieferant der Manufaktur.

Mit der Verbreitung der mechanischen Antriebe, der Transmissionen, der Maschinen und besonders der komplizierten Automaten begegnete man immer häufiger Menschen, die Gelehrte und mechanici in einer Person sind. Diesen

Menschentyp fanden wir schon im 15. Jahrhundert. Zuvor war so etwas nicht einmal denkbar. Vor dem 15. Jahrhundert verstand man unter einem mechanicus einen Handwerker und unter einem Gelehrten einen Kommentator von theologischen oder aristotelischen Schriften. Wenn nun ein neuer Typus von Menschen entstand, der sowohl Gelehrter als auch Vertreter der handwerklichen Praxis war, so hatte das auch für die Technik und die Naturwissenschaft prinzipielle Bedeutung.

Die mechanici standen den Architekten am nächsten. In dem Maße, wie die Hydrotechnik im weitesten Sinne, d. h. der Bau von Kanälen, von Wasserleitungen, Fontänen und Wassermühlen, neben der Errichtung von Häusern, Kirchen, Palästen und Festungen zur Entwicklungsgrundlage der Mechanik wurde, veränderte sich auch ihr Grundcharakter. Die Maschinen, besonders die Mühlen, stellten der Mechanik der festen Körper dynamische Probleme.

Mit dem Abgehen von rein empirischen Methoden beginnt die Loslösung der Produktionskenntnisse von der unmittelbaren Erfüllung der Produktionsaufgaben. Schulen kommen auf, in denen die Studierenden nicht handwerkliche Geheimnisse, sondern Kenntnisse von allgemeiner Bedeutung aufnehmen. In entsprechender Weise entwickelt sich die wissenschaftlich-technische Literatur. In diesen Schulen und dieser Literatur geht man von rein empirischen Rezepten zur Erklärung von Kausalzusammenhängen über. Die Schulen für mechanische und mathematische Kenntnisse unterscheiden sich von den Universitäten und kirchlichen Lehranstalten, in denen nach wie vor die Scholastik herrscht. In den neuen Schulen werden Architekten, Artilleristen, Festungsbaumeister, Konstrukteure u. a. ausgebildet. Sie sammeln sich um die Fürstenhöfe und erbauen Festungen, Paläste, Kanäle, Wasserleitungen und Manufakturen. Hier entstehen allmählich die höfischen wissenschaftlichen Gesellschaften und Akademien. Besondere Aufmerksamkeit widmen diese Gesellschaften der angewandten und später auch der theoretischen Mechanik. Von Wasser und Wind ausnutzenden Mechanismen, Pumpen, mechanischen Transmissionen und Maschinen, die in Manufakturunternehmen, in Werften, Fabriken und Bergwerken angewandt werden, von den automatischen Geräten (Uhren) und von der Artillerie gingen die wichtigsten Impulse für die Wissenschaft aus. Die Mechanik des 17. Jahrhunderts ging über statische Aufgaben hinaus. Wie wir bereits zeigten, strebte die Wissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts danach, alle komplizierten Naturerscheinungen mit mechanischen Analogien und Begriffen zu erklären. Solange jedoch die Gesetze der Dynamik noch nicht bekannt waren, konnte kein umfassendes System aufgebaut werden, das die kosmischen Erscheinungen aus mechanischen Ursachen zu erklären vermochte. Die Dynamik des 17. Jahrhunderts wurde durch die Entwicklung der angewandten Mechanik und besonders durch die Anwendung von Maschinen vorbereitet. Einfache Gesetze wurden formuliert, die für einen langen Zeitraum zum Ideal der wissenschaftlichen Erklärung der gesamten Naturwissenschaft wurden. Die Begriffe der Trägheit, des Impulses und der Beschleunigung bildeten den Rahmen, in dem die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Beobachtungen — anfangs der Astronomie, später auch der Physik, Chemie, Geologie — Platz fanden. Handel und Reiseverkehr vergrößerten ständig die Kenntnisse in diesem Bereich.

Die sporadische Anwendung von Energiemaschinen in der Manufaktur hatte den Weg zu wissenschaftlichen Vorstellungen vom rationalen Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Formen der mechanischen Bewegung gewiesen. Die eigentlich technologische Seite der Manufakturproduktion vermochte hingegen nicht solche Bedeutung zu erlangen. In ihrer Technologie, bei der Anwendung von physikalischen und chemischen Rezepten bedienten sich die Manufakturen der handwerklichen Traditionen. Das Handwerk blieb die Basis der Manufaktur.

In der handwerklichen mechanischen und chemischen Technologie waren die handwerklichen „Geheimnisse" tatsächlich Geheimnisse. Wurde in einen Tiegel Silbererz, Salz, Quarz und Quecksilber getan, so vermochte im 17. Jahrhundert niemand zu sagen, auf welche Weise nun das Amalgam gewonnen wird. Der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang war noch nicht herausgearbeitet worden. Wollte man den kausalen mechanischen Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Salz und der Bildung des Amalgams sehen, so mußte man die elementaren Umwandlungen und Verbindungen der Atome des Stoffes untersuchen. Aber so weit war es noch längst nicht. Für den Forscher des 17. Jahrhunderts, der empirischer Technologe war, erschien der kausale Zusammenhang als Geheimnis. Dabei ließ man sich von der Tradition, vom empirisch festgestellten „Einfluß" des Salzes oder des Quecksilbers leiten. Mit dem handwerklich-empirischen Charakter der physikalischen und chemischen Technik verbinden sich Vorstellungen von „Einflüssen", „Sympathien", „Prinzipien", also das ganze Arsenal der mittelalterlichen Scholastik. Hingegen verbinden den Ingenieur-Mechaniker, den Architekten, den Erbauer von Wasserrädern mit dem Wissenschaftler neuen Typs gerade kausal-mechanische Naturvorstellungen.

Auch die Kriegstechnik hat die Mechanik weiterentwickelt. Die Erfindung des Pulvers und die darauf basierenden weiteren technischen Erfindungen verstärkten die Rolle der angewandten Mechanik in der wissenschaftlichen Entwicklung. Die rein mechanischen Aufgaben der Ballistik waren eine der praktischen Hauptquellen der Dynamik des 17. Jahrhunderts. Das Problem eines frei geworfenen schweren Körpers wurde erstmalig in der Ballistik gestellt. Zur Ausarbeitung von Tabellen für das Artillerieschießen mußte festgestellt werden, wie sich eine Kanonenkugel unter dem Einfluß des Anfangsimpulses und der Schwerkraft bewegt. Für die Bestimmung der Flugbahn mußte die Addition der Inertialbewegung und der gleichförmig beschleunigten Bewegung im Gravitationsfeld theoretisch berücksichtigt werden.

Die Beziehungen zwischen Naturwissenschaft und Produktion erklären allerdings nicht die für die Ausarbeitung des mechanischen Weltbildes kennzeichnende Intensität und ihre Ausmaße. Sie bringen auch nicht die konkreten historischen Formen der geistigen Auseinandersetzungen in der Naturwissenschaft des 17. Jahrhunderts zum Ausdruck.

Will man die historischen Quellen der modernen Naturwissenschaft aufzeigen, so muß man nicht nur über die Entwicklung der Produktivkräfte, sondern auch über die Entstehung neuer gesellschaftlicher Verhältnisse sprechen.

Die Naturwissenschaft des 16. und 17. Jahrhunderts steht historisch mit der Entstehung bürgerlicher Gesellschaftsverhältnisse innerhalb des Feudalismus,

mit dem Kampf der Bourgeoisie gegen den Feudalismus im Zusammenhang. Bereits im 16. und 17. Jahrhundert, als die Herrschaft der Bourgeoisie nicht mehr fern war, wurden einige Ergebnisse der Entwicklung der kapitalistischen Produktion und der Zusammenstöße zwischen Bourgeoisie und Adel sichtbar. Sie wurden in der Entwicklung wissenschaftlicher Interessen und der Wissenschaft selbst besonders deutlich.

Der Klassenkampf verlieh der Kultur jener Zeit einen kämpferischen Charakter, Kühnheit und Weite. In dieser Atmosphäre wurden die Kenntnisse über die Mechanik zur mechanischen Weltanschauung. Ihre Schöpfer antworteten nicht nur auf die Fragen der Kalendermacher, Baumeister und Artilleristen, sondern sie kämpften auch für die Befreiung der Gesellschaft von überlebten Kräften.

Der Klassenkampf wirkte auf die Entwicklung der Naturwissenschaften sehr vielschichtig ein. Die Bourgeoisie war ökonomisch und politisch innerhalb der Feudalgesellschaft herangereift. Sie stand dieser Gesellschaft feindlich gegenüber und bereitete sich zum entscheidenden Kampf gegen die Feudalverhältnisse vor. Ihr Kampf für eine neue Gesellschaftsordnung ging mit breiten Volksbewegungen einher. Gleichzeitig bestürmten erfolgreiche Vertreter der bürgerlichen Klasse die Fürstenhöfe mit Bitten, suchten aus Furcht vor den umfassenden Volksbewegungen einen Kompromiß mit den Feudalen, rechneten mit den fortschrittlichsten Persönlichkeiten ihrer Zeit hart ab und verbündeten sich mit den Jesuiten zum Kampf gegen die Revolution. Je folgerichtiger und entschiedener die Bourgeoisie gegen die alte Gesellschaft kämpfte, desto größer wurde ihr Recht, im Namen des Volkes aufzutreten. Je mehr das bürgerliche Denken die Interessen und Hoffnungen der Volksmassen widerspiegelte, desto nachdrücklicher und progressiver wurde auch ihre Einwirkung auf die von der Naturwissenschaft im 17. und 18. Jahrhundert entwickelten konkreten historischen Formen. Friedrich Engels verweist in seinen bekannten Bemerkungen über die Quellen der modernen Naturwissenschaft nicht von ungefähr auf die Bauernaufstände, in denen sich „hinter den Bauern die revolutionären Anfänge des modernen Proletariats, schon die rote Fahne in der Hand und den Kommunismus auf den Lippen“[1] zeigten. Hier liegen die realen historischen Wurzeln, die die Schärfe des Kampfes zwischen den fortschrittlichsten wissenschaftlichen Strömungen und der Reaktion erklären.

Die Wissenschaft, und vor allem das verallgemeinernde Ergebnis des wissenschaftlichen Experiments, der empirischen Beobachtungen und der mathematischen Analyse, das verallgemeinernde Resultat aller Wege und Methoden des wissenschaftlichen Schaffens, das physikalische Bild des Weltalls, wandte sich damit gegen die Kirche. Die literarische und künstlerische Tätigkeit der Humanisten, die mit der kirchlichen Autorität unvereinbare Gedanken und Gefühle in der Gesellschaft hervorrief, die Reformation, die ganze Länder vom Katholizismus befreite, und schließlich das Abstreifen der deistischen Hülle, die direkte und kühne Attacke der Denker des 18. Jahrhunderts gegen die Religion — alle diese Komponenten reinigten die Wissenschaft. Das Bild des unendlichen, von ein-

[1] F. Engels, Dialektik der Natur, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, Berlin 1962, S. 464.

fachen mechanischen Gesetzen beherrschten Weltalls wurde zu einer gewaltigen gesellschaftlichen Kraft. Das wurde von den miteinander kämpfenden Klassen in seiner Bedeutung voll erkannt. So zog Giordano Bruno seine antitheologischen Schlußfolgerungen aus der kopernikanischen Lehre, so verbreitete Voltaire die Ideen Newtons, erhob die Forderung nach „Zerschmetterung des Ungeheuers", der katholischen Kirche. Noch radikalere Denker des 18. Jahrhunderts erkannten, ausgehend von den Ergebnissen der Wissenschaft, die Volksrevolution gegen Kirche und Absolutismus als berechtigt.

2. Nikolaus Kopernikus

Ausgangspunkt des im 17. Jahrhundert entstehenden Weltbildes war die im 16. Jahrhundert geschaffene kopernikanische Lehre. Sie enthielt ein durch die gesamte spätere Wissenschaftsentwicklung bewiesenes kinematisches Schema des Sonnensystems, bildete den Ausgangspunkt für die Entwicklung der Himmelsmechanik und ermöglichte schließlich, Begriffe aus der Mechanik der irdischen Körper auf den Kosmos anzuwenden. Kopernikus verwarf außerdem die Forderungen des kirchlichen Dogmas und der scholastischen Tradition. Seine Lehre bezeichnet den Beginn der ständigen Kämpfe zwischen der Naturwissenschaft und den Kräften des Mittelalters.

Drei Jahrhunderte lang stand das kopernikanische System nicht nur im Zentrum astronomischer Untersuchungen, sondern auch im Mittelpunkt der philosophischen und gesellschaftlichen Auseinandersetzungen.

Einer der wichtigsten Streitpunkte war die Frage nach dem objektiven Charakter des heliozentrischen Weltsystems. Die Kirche verteidigte das traditionelle kanonisierte Dogma und suchte bisweilen die neue Weltvorstellung als eine nützliche, aber nicht auf objektive Wahrheit Anspruch erhebende Konvention zu interpretieren. Es vollzog sich ein intensiver Kampf zwischen dieser pragmatisch-formalen Version und dem Bestreben fortschrittlicher Denker, ein der objektiven Realität entsprechendes Weltbild zu entwickeln.

In der Astronomie des Mittelalters wurde dem Dogma von der absoluten Trennung von Himmel und Erde entscheidende Bedeutung beigemessen. Die Erde wurde dabei als der unvollkommene, sündhafte Bereich der Veränderungen angesehen, der Himmel als vollkommen, unveränderlich und absolut. Die unvollkommene Erde war allerdings Zentrum des Weltgebäudes. Die mittelalterliche Astronomie wiederholte die Lehre des Aristoteles und Ptolemäus von der kreisförmigen und gleichförmigen (d. h. vollkommenen sowie unveränderlichen) Bewegung der Himmelskörper. Sie bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit um die unbeweglichen Körper. Ein solcher unbeweglicher Körper ist die Erde. Jede Bewegung, die der irdische Beobachter wahrnimmt, ist eine wahre und absolute Bewegung. Die Planeten bewegen sich ungleichförmig, beschreiben am Himmel unregelmäßige Bahnen. Einige von ihnen (Merkur und Venus) bewegen sich immer in der Nähe der Sonne, andere (Mars, Jupiter, Saturn) sind bald unbeweglich gegenüber anderen Sternen, bald bewegen sie sich unter den Sternen von

Westen nach Osten und von Osten nach Westen. Die Sonne bewegt sich offensichtlich ungleichförmig um die Erde, weil die Dauer der Jahreszeiten etwas differiert. Um die Unregelmäßigkeit in der Bewegung der Himmelskörper erklären zu können, setzte Hipparch die Erde nicht in den Mittelpunkt der Kreisbahn der Sonne. Dadurch entsprach die berechnete Dauer der Jahreszeiten den Beobachtungen. Die ungleichförmige Planetenbewegung konnte man sich erklären, indem man annahm, daß sich die Planeten in Epizyklen und die Zentren dieser Epizyklen in Kreisbahnen bewegen. Aristoteles strebte danach, daß sein astronomisches System mit der objektiven Realität übereinstimmt. Ptolemäus hingegen hielt das Prinzip der größten Einfachheit der Beschreibung der Erscheinungen für das einzige Kriterium astronomischer Überlegungen. Einige später wirkende Denker der Antike leugneten überhaupt die Erkennbarkeit der Bewegung der Himmelskörper.

Nach Kopernikus verwarf die Astronomie allmählich mystische Argumente, theologische Kriterien, Überlegungen über die „Vollkommenheit“ des Himmels usw. Dadurch näherte sie sich der Mechanik irdischer Körper. Kopernikus verwarf die scholastischen Kategorien, die den absoluten Unterschied von Himmel und Erde zu beweisen suchten. Aber die wirkliche Verbindung der Mechanik irdischer Körper und der Himmelsmechanik wurde erst von Newton hergestellt. Die großen Entdeckungen in der Astronomie und die allmähliche Entwicklung der Begriffe der Mechanik im 16. und 17. Jahrhundert waren Etappen der allmählichen Annäherung der Theorie der Bewegung der Himmels- und der irdischen Körper. Nach Kopernikus schuf Kepler eine Himmelsmechanik, die rational gedeutet ein einheitliches System ergab, das die Erfahrung der aus der Produktion herkommenden angewandten Mechanik mit den Ergebnissen astronomischer Beobachtungen verband. Galilei führte einen Umschwung in Weltanschauung und Methode der Wissenschaft herbei, indem er nachwies, daß das gesamte Weltall ein unendliches Forschungsfeld ist und sich der rationalen Methoden der Mechanik irdischer Körper bediente.

Nikolaus Kopernikus' Buch „Über die Kreisbewegungen der Weltkörper“ war Ausgangspunkt dieser Entwicklung. Kopernikus war ein echter Sohn seines Jahrhunderts, ein vielseitiger Denker und Praktiker, Organisator der bewaffneten Abwehr der Deutschritter, ein hervorragender Ökonom, Arzt und Staatsmann. Der Frauenburger Kanzler des Domkapitels stand den katholischen wie den protestantischen Kirchendogmen kritisch gegenüber. Dies wurde ihm nach seinem Tode von Wittenberg und Rom mit Feindschaft vergolten. Denn des Kopernikus wichtiges Buch „Über die Kreisbewegungen der Weltkörper“ erschien nicht zu seinen Lebzeiten, sondern 1543 postum.

In seinem Buche entwickelt Kopernikus ein kinematisches Bild des Sonnensystems. Dabei geht er von folgenden Überlegungen aus: Merkur und Venus scheinen sich von der Erde aus gesehen stets neben der Sonne zu befinden, und sie zeigen sich niemals an der der Sonne entgegengesetzten Seite des Himmels. Dabei steht Merkur stets der Sonne näher; er erreicht niemals eine solche Entfernung wie Venus. Hieraus folgt, daß Merkur und Venus in Bahnen um die Sonne kreisen, die innerhalb der Erdbahn liegen. Mars, Jupiter und Saturn treten manchmal in

Opposition zur Sonne, mit anderen Worten, die Erde steht manchmal zwischen der Sonne und diesen Planeten. Während der Opposition zur Sonne leuchten diese Planeten heller und stehen folglich der Erde näher. Also sind die Bahnen der genannten drei Planeten weiter von der Sonne entfernt als die Erdbahn. In ihren sichtbaren Bewegungen sind einige Ungleichförmigkeiten zu bemerken. Diese besitzen eine dem Erdjahr entsprechende Periodizität und können folglich durch die Bewegung der Erde um die Sonne erklärt werden. Kopernikus zieht den Schluß: Je geringer diese Ungleichförmigkeiten sind, desto weiter ist der entsprechende Planet entfernt. Der Planet Saturn bewegt sich auf einer sehr entfernten Bahn, näher folgen Jupiter und erst recht Mars. Aus alledem folgt: Die Erde ist nicht das Zentrum des Weltgebäudes. Sie ist einer der sechs um die Sonne kreisenden Planeten. Dieses Schema wird mit einem umfangreichen mathematischen Apparat entwickelt und bewiesen. In der ersten Darlegung des kopernikanischen Systems, einem kurzen Entwurf, den Kopernikus in seiner Jugend schrieb, finden sich diese mathematischen Konstruktionen noch nicht. Dieser unter der Bezeichnung „Commentariolus" bekannt gewordene Traktat ist zu Kopernikus' Lebzeiten nicht veröffentlicht worden; das Manuskript wurde erst 1877 aufgefunden.

In dieser Abhandlung stellt Kopernikus fest, daß die Erde nur für die Mondumdrehung als Zentrum dient, während die Sonne Zentrum der Umdrehungen aller Planeten ist. Die Fixsterne sind so weit von der Sonne entfernt, daß ihre Entfernung mit den Radien der Planetenbahnen nicht vergleichbar ist. Die sichtbare Bewegung des Himmelsgewölbes im ganzen wird durch die reale Drehung der Erde um ihre Achse, die jährliche Bewegung der Sonne durch die reale jährliche Bewegung der Erde um sie erklärt. Diese jährliche Bewegung der Erde um die Sonne ist Ursache der scheinbaren Veränderung des Sternenhimmels im Verlaufe des Jahres. In Weiterentwicklung dieser Thesen legt Kopernikus in aller Kürze sein heliozentrisches System dar. Dabei stützt er sich auf das Prinzip der Kreisbewegungen der Himmelskörper. Dieses Prinzip war der neuen Astronomie vom Altertum und Mittelalter überkommen, und Kopernikus wie Galilei hielten daran fest. Erst Kepler führte die elliptische Bewegung in die Himmelsmechanik ein. Kopernikus entwickelte wie schon Ptolemäus den Gedanken der Addition komplizierter Bewegungen aus gleichförmigen Kreisbewegungen, die Idee der Epizyklen, um die sichtbare Bewegung der Himmelskörper mit dem Prinzip der kreisförmigen gleichförmigen Bewegung in Einklang zu bringen. Weicht die Bahn eines Planeten von der Kreisbahn ab, so bedeutet das lediglich, daß er sich in Epizyklen bewegt, deren Zentrum sich auf einem Kreis bewegt. Kopernikus ersetzte den Grundgedanken des Ptolemäus von der Unbeweglichkeit der Erde durch ein völlig neues Prinzip. Er übernahm aber die Epizyklen und Exzentren der Ptolemäischen Himmelsmechanik.

In seinem Buche äußerte Kopernikus den Gedanken der Relativität der Bewegung, der für die Geschichte der Wissenschaft äußerst bedeutsam ist. Wir wollen darauf ausführlicher eingehen:

Wie Kopernikus zeigte, scheint sich, wenn sich die Erde um die Sonne bewegt, die Sonne um die Erde zu bewegen. Folglich kann die sichtbare Bewegung der Himmelskörper nicht nur Ergebnis der wirklichen Bewegung dieser Körper,

sondern auch der tatsächlichen Bewegung der Erde sein. Kopernikus benutzt das schon im Altertum bekannte und in der mittelalterlichen wissenschaftlichen Literatur sehr umfassend verwendete Beispiel von den Ufern, die sich entsprechend der Bewegung des Schiffes bewegen. Er zitiert die Verse Vergils: „Wir laufen aus dem Hafen aus, und Länder und Städte weichen zurück.“[2]

Kopernikus benutzte das Prinzip der Relativität der Bewegung gegen die Argumente zugunsten des geozentrischen Weltbildes. Die geozentrische Auffassung stützte sich auf das Bild eines verheerenden Sturmes, der alles von der Erdoberfläche hinwegfegen würde, falls sich die Erde bewege. Kopernikus betonte dagegen, daß die Erdatmosphäre an ihrer Umdrehung teilhabe und daß daher alle in der Luft vorgehenden Erscheinungen die Bewegung der Erde nicht nachweisen könnten.

Die Himmelskinematik ist bei Kopernikus keine formale mathematische These, sondern entspricht der physikalischen Realität. Kopernikus behauptet, wie auch später Galilei und Kepler, die absolute physikalische Realität der in seinem Buche beschriebenen Bewegungen der Himmelskörper. Eine andere Behandlung erfährt dieses Problem in Osianders bekanntem Vorwort zum Buch des Kopernikus. Dieses Vorwort ist Resultat der Reaktion auf die Anschauungen des Kopernikus.

In der Zeit, da das Buch des Kopernikus erschien, verhielten sich die protestantischen Theologen zum wissenschaftlichen Weltbild nicht weniger unversöhnlich als die katholische Geistlichkeit.

Die katholische Geistlichkeit verteidigte nicht nur die Autorität des Alten und des Neuen Testaments, sondern auch die der Kirchenväter und des Aristotelismus. Der Protestantismus stützte sich auf den Buchstaben der Bibel und duldete nicht, daß er in irgendeiner Weise frei interpretiert wurde. Der Kampf gegen das freie Denken inhärierte die unerbittliche Verfolgung auch der kleinsten Abweichungen von der „physica sacra“. Die Wittenberger Theologen erklärten, der Verstand habe sich dem Glauben unterzuordnen. Schon in den Jahren, da der Vatikan das Weltbild des Kopernikus noch nicht angriff, nannte Luther den Begründer des heliozentrischen Weltbildes einen Narren, der die ganze astronomische Wissenschaft umkehren wolle. Luther berief sich auf das biblische Buch Josua, wo nicht die Erde, sondern die Sonne angehalten werde.[3] Melanchthon, der engste Mitarbeiter Luthers und Ideologe des Protestantismus, forderte die Obrigkeit auf, gegen die kopernikanische Lehre vorzugehen.

Das Buch „Über die Kreisbewegungen der Weltkörper“ wurde unter Beteiligung eines Gesinnungsgenossen von Luther und Melanchthon herausgegeben. Kopernikus übergab das Manuskript nämlich seinem Freund und Verehrer G. J. Rheticus, der es nach Nürnberg brachte. Aber Rheticus vermochte die Korrekturen des Druckes nicht vorzunehmen und übertrug diese Aufgabe dem Theologen und Mathematiker A. Osiander. Dieser suchte dem Kopernikanischen Werk seinen antikirchlichen Gehalt zu nehmen und schrieb ein entsprechendes Vorwort, das

[2] N. Copernicus, Über die Kreisbewegungen der Weltkörper, 1. Buch, hrsg. u. eingel. v. G. Klaus, Berlin 1959, S. 53.

[3] M. Luther, Werke, Tischreden, Bd. 4, Weimar 1916, Nr. 4638.

lange Zeit Kopernikus selbst zugeschrieben wurde. Der Hauptgedanke dieses Osianderschen Vorworts besteht darin, daß die Erdbewegung lediglich eine formale mathematische Hypothese wäre. So wird hier gesagt: Es wäre sinnlos anzunehmen, daß in dem Buch die Bewegung der Erde beschrieben werde.

Dabei hatte Kopernikus die objektive physikalische Bedeutung des heliozentrischen Systems betont. Die mittelalterlichen Scholastiker hatten fiktive, rein formale Vorstellungen entwickelt und sich an ihrer logischen Strenge ergötzt. Sie betonten, derartige Konstruktionen wären keineswegs absolut zu nehmen und wären nur formale Verfahren zur Beschreibung von Erscheinungen. Für die mittelalterlichen Scholastiker konnten auch willkürliche Konstruktionen zur Wissenschaft gehören, weil sie dem Wesen nach als ein Bereich relativer Wahrheiten galt.

Osiander sagt in seinem Vorwort, daß Kopernikus sich überhaupt nicht zum Ziel gesetzt habe, die wirkliche Planetenbewegung zu beschreiben. Nach seiner Meinung stelle sich die Astronomie überhaupt nicht eine derartige Aufgabe. Nach Osiander sind die Hypothesen der Astronomen rein pragmatisch. Der Astronom muß zu richtigen Berechnungen kommen, die für die Kalenderherstellung und ähnliche Aufgaben erforderlich sind: „Es ist nämlich nicht erforderlich, daß diese Hypothesen wahr, ja nicht einmal, daß sie wahrscheinlich sind, sondern es reicht schon allein hin, wenn sie eine mit den Beobachtungen übereinstimmende Rechnung ergeben.“[4] Speziell das kopernikanische System sei auf ganz relative Hypothesen gegründet. „Denn es ist hinlänglich bekannt, daß diese Lehre die Ursachen der scheinbar ungleichmäßigen Bewegungen einfach gar nicht kennt; und wenn sie welche in der Vorstellung erdenkt, wie sie denn sicherlich sehr viele erdenkt: so erdenkt sie dieselben keineswegs zu dem Zwecke, um irgend Jemanden zu überreden, daß es so sei, sondern nur dazu, damit sie die Rechnung richtig begründen.“[5] Nach Osianders Meinung kann die echte Wahrheit nur Resultat der „göttlichen Inspiration“ sein. Die astronomischen Arbeiten enthalten lediglich relative Behauptungen. Philosophen wie Astronomen müssen sich nach Osiander auf die relative Wahrheit beschränken.

Bei weitem nicht alle Theologen der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts wandten sich gegen Kopernikus. Viele vertraten den Standpunkt Osianders. Außerdem bediente sich die katholische Kirche zur Lösung von praktischen, aus der Kalenderreform erwachsenden Aufgaben der Kopernikanischen Arbeiten. So wurde ein Kompromiß zwischen praktischen, letztlich aus der Produktion erwachsenden Aufgaben und den ideologischen Prinzipien des Mittelalters hergestellt.

Dieser Kompromiß hielt nicht lange an. Das kopernikanische System war seinem Wesen nach mit der Anerkennung der kirchlichen Autorität nicht vereinbar. Die „Kreisbewegungen der Weltkörper“ stellten eine Herausforderung an die Kirche dar. Diese Herausforderung wurde ein halbes Jahrhundert später in direkter Form von Giordano Bruno angenommen.

[4] A. Osiander, An den Leser über die Hypothesen dieses Werkes, in: N. Copernicus, Über die Kreisbewegungen der Weltkörper, Leipzig 1939, S. 1.
[5] Ebenda.

Nachdem Bruno das Buch des Kopernikus gelesen hatte, brach er konsequent mit den mittelalterlichen Vorstellungen vom Weltall. Er wurde der Häresie beschuldigt und mußte deshalb vor der Neapolitanischen Inquisition fliehen. Die fünfzehnjährige Wanderschaft Brunos hob an. Er wandte sich von Nola nach Turin, von Turin nach Genf, wo die Calvinisten zwanzig Jahre zuvor Michael Servet verbrannt hatten. Dann weilte er in Frankreich, England und Deutschland. Brunos heimatloses Umherirren fand 1591 mit seiner Reise nach Venedig ein Ende. Hierher hatte ihn der venetianische Edelmann Mocenigo eingeladen, der Bruno bald der Inquisition in die Hände spielte. Von Venedig wurde Bruno nach Rom verschleppt. Nach siebenjähriger Kerkerhaft wurde er nach dem Urteilsspruch der Inquisition seiner Priesterwürde entkleidet, aus der Kirche ausgestoßen und den weltlichen Gerichten „zur möglichst leichten Bestrafung ohne Blutvergießen", d. h. zur Hinrichtung auf dem Scheiterhaufen, übergeben. Im ersten Frühling des neuen Jahrhunderts, am 17. Februar 1600, wurde Giordano Bruno auf dem Campo dei fiore (Blumenmarkt) lebendig verbrannt.

Bruno ist in einer Reihe von Fragen bedeutend weiter gegangen als Kopernikus. Kopernikus hielt an der traditionellen Vorstellung von den Sternen als Lichtquellen fest, die sich ihrer Natur nach von der Sonne unterscheiden. Die Sterne erschienen dabei mit der Sonne nicht nur hinsichtlich ihrer physikalischen Natur — sie ist für Kopernikus völlig unklar —, sondern auch hinsichtlich ihrer Größen nicht vergleichbar. Auch Kepler hat noch keine Ähnlichkeit zwischen den Sternen und der Sonne gesehen. Wir finden bei ihm noch unklarere Vorstellungen von der Natur der Sterne als bei Bruno. Kepler warf sogar die Frage auf, ob die Sterne nicht geschliffene leuchtende Sphären darstellten, die durch ihre Bewegung das Flimmern des Lichtes hervorrufen. Bruno schrieb, Kopernikus habe sich vorrangig mit der mathematischen Seite der Astronomie beschäftigt und deshalb hätten einige alte Traditionen weitergewirkt, die zwar mit dem mathematischen Apparat der neuen Theorie übereinstimmen, aber ihr in ihrem Wesen widersprechen. Zu diesen alten Traditionen zählte Bruno den Gedanken von der Sonne als dem Zentrum des Weltalls. Kopernikus ging in seinem Weltbild nicht über das Sonnensystem hinaus. Er betrachtete das ganze Weltall als ein sich um unsere Sonne bewegendes System. Das war zweifellos ein grundlegender Umschwung in der Astronomie. Aber Bruno spricht im Unterschied zu Kopernikus vom unendlichen, kein Zentrum besitzenden Weltall. Seine Unendlichkeitsvorstellung bringt Giordano Bruno besonders eindrucksvoll in dem Buch „Vom unendlichen All und den Welten" zum Ausdruck.

3. Johannes Kepler

Im Buch des Kopernikus wurde noch nicht mit den Vorstellungen von Epizyklen und Exzentren gebrochen, die auf den traditionellen Gedanken der Vollkommenheit der Himmelsbewegung basierten. Kepler verwarf das traditionelle Kriterium der „Vollkommenheit" und daher die gleichförmige Kreisbewegung der Himmelskörper. Im Vergleich zu Kopernikus stützte er sich außerdem auf

neue, bedeutend exaktere astronomische Beobachtungen, die in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts von Tycho de Brahe gewonnen worden waren. Nach Verarbeitung einer großen Anzahl derartiger Beobachtungen stellte Kepler die elliptische Form der Planetenbahnen fest. Außer dem Gedanken der Kreisbahnen mußte noch eine zweite traditionelle Annahme verworfen werden. Das 16. Jahrhundert hatte von der antiken Wissenschaft die Idee der gleichförmigen Planetenbewegung entlehnt. Kepler bewies nun, daß sich die Geschwindigkeit der Planeten so ändert, daß ihre Radiusvektoren in gleichen Zeiten gleich große Flächen überstreichen. Dies ist das zweite Keplersche Gesetz. Nach Bestimmung der Bahnformen und der Geschwindigkeiten der Planetenbewegung mußten Geschwindigkeit und Entfernung von der Sonne in einer mathematischen Formel zusammengefaßt werden. Dies tat Kepler in seinem dritten Planetengesetz: Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der mittleren Abstände von der Sonne.

Kepler sah das Weltall als begrenzt an. Im Zentrum der Weltsphäre befindet sich die Sonne. Sie ist Quelle der Bewegungskräfte, der Harmonie und des Lichtes. Die bewegende Kraft der Sonne erstreckt sich auf einen verhältnismäßig kleinen Raum, in dem sich die Planeten befinden: Die Sonne dreht sich um ihre Achse und führt durch Kraft„fäden" die Planeten mit. Die innerhalb der Grenzen des sphärischen Weltalls angeordneten Planeten und Fixsterne befinden sich in durch eine bestimmte Proportionalität untereinander verbundenen Entfernungen von der Sonne. Der Bahnradius des Saturn, des entferntesten der damals bekannten Planeten, ist zweitausendmal größer als der Radius der Sonne. Der Radius der Fixsternsphäre, d. h. der Weltgrenze, ist gleich vier Millionen Sonnenradien. Der Kosmos ist voller Ätherstoffe, die sich verdichten und die Kometen und neuen Sterne schaffen.

Einer der Grundgedanken dieses Weltbildes war Keplers Vorstellung vom Licht. Er sieht es als eine gewichtslose Materie an, die sich mit unendlicher Geschwindigkeit von den leuchtenden Körpern nach allen Seiten geradlinig ausbreitet. Dabei nimmt die Lichtkraft mit dem Quadrat der Entfernung ab. Noch bedeutender waren Keplers Auffassungen von der Schwerkraft und dem Magnetismus. Er bezog sich in dieser Frage teilweise auf Gilbert. Für Gilbert ist die Schwere das Streben, die einzelnen Teile zu vereinigen. Dabei erfolgt die Vereinigung auf kürzestem Wege. Gilbert spricht keineswegs von der Schwerkraft im ganzen Weltall. Ursache der Bewegung ist eine besonders substantielle Form, die jedem Himmelskörper eigen ist. Jeder Himmelskörper besitzt andere Kräfte, um anzuziehen.

Kepler verwarf die theologischen Überlegungen vom Streben der Körper nach einer gemeinsamen Quelle, wo sie „in Ruhe bleiben, bewahrt von jeder Gefahr". Dementsprechend verschwindet auch der Unterschied zwischen den Schwerkräften auf den einzelnen Himmelskörpern. Dieselbe Kraft zwingt zur gegenseitigen Anziehung des Mondes und der Erde. Somit wird die Schwerkraft zu einem universellen Wesensmerkmal des Stoffes. Hieraus ergibt sich, daß die Elemente des Stoffes durch die Schwerkraft wechselseitig miteinander verbunden sind. Wenn bei Gilbert Teile der Himmelskörper zu ihrem Zentrum gravitierten,

so gravitieren sie bei Kepler miteinander. Kepler gibt die traditionellen Vorstellungen von der Schwerkraft als dem Streben eines jeden Körpers nach seinem „natürlichen Ort" im Weltall auf. Die Schwerkraft richtet sich bei ihm überhaupt nicht auf einen Ort, sondern auf einen Körper. Diesen Teil seiner Lehre von der Schwerkraft hat Kepler besonders ausführlich und überzeugend dargelegt.

Die bewegende Kraft der Sonne verbreitet sich nach Kepler in der Ebene der Ekliptik. Wenn man sich daher konzentrische Kreise vorstellt, die der Strom der Antriebskraft erreicht, so wird sich dieselbe Kraft auf immer größere Kreisbogen ausbreiten. Die Länge dieser Bogen ist den Radien direkt proportional. Deshalb dachte Kepler auch, die bewegende Kraft der Sonne nehme proportional zur Entfernung ab. Keplers Gedanken zur Dynamik entspringen also unmittelbar seinen physikalischen Hypothesen. Letztere waren noch weitgehend dem Mittelalter verhaftet. Für Kepler ist die Annäherung verschiedener Begriffe nach rein äußerlichen, manchmal vom Wort herkommenden Assoziationen kennzeichnend. Wenn die Alchimisten dem roten Oxyd des Quecksilbers besondere chemische Machtfülle zusprachen, weil Purpur das Symbol der Macht ist, so meinte Kepler, in der „Sphärenmusik" entsprächen die harmonischen Zahlen der Erde den Noten „Fa" und „Mi". Diese Bezeichnungen sind die ersten Silben der Worte fames (Hunger) und miseria (Elend). Daraus wird gefolgert, die Erde sei ein Ort des Hungers und des Elends. In vielen Fragen ging Kepler mit seinen akausalen symbolischen und mystischen „Einflüssen" und dem ganzen Arsenal mystischer Begriffe auf das wissenschaftliche Denken des Mittelalters zurück. Die von Kepler seiner Dynamik zugrunde gelegten Hypothesen entstammen zum Teil ebenfalls dem Mittelalter. In der Sonne gibt es demnach eine „Lebenskraft", die in der Drehung der Sonne um ihre Achse zum Ausdruck kommt. Durch diese Rotation verbreitet die Sonne um sich eine Kraft, die die Planeten erfaßt und ihre Umdrehung um die Sonne bewirkt. Diese Kraft unterscheidet sich nicht prinzipiell vom Magnetismus und nimmt umgekehrt proportional zur Entfernung ab.

Und dennoch weist Keplers Dynamik weit nach vorn, wenn sie auch noch eindeutig mittelalterliche und veraltete Elemente enthält. Kepler wollte über die Grenzen des rein kinematischen Weltbildes hinausgehen und die objektiven Ursachen der Beschleunigung aufzeigen. Er brach deshalb mit der Kinematik der gleichförmigen Bewegungen, die Kopernikus von Ptolemäus übernommen hatte. Kepler suchte nach den Ursachen der ungleichförmigen kosmischen Bewegung und fand sie in der bewegenden Kraft der Sonne. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um die Newtonsche Zentripetalkraft, sondern um eine Kraft, die den Planeten fortreißt und ihn zwingt, eine elliptische Bewegung zu vollziehen. Kepler fehlte der Begriff der Trägheit, um zu einer richtigen Auffassung zu gelangen. Trägheit ist für ihn die Trägheit der Ruhe. Von der Inertialbewegung wußte Kepler nichts. Nach seiner Meinung kommt eine nicht von einer Kraft unterstützte Bewegung zum Erliegen, und deshalb sucht er eine die Bewegung der Himmelskörper bewirkende Kraft.

Kepler suchte zu verstehen, weshalb es genaue Proportionen zwischen den Perioden der Planetenumläufe und der Größe ihrer Bahnen gibt; er wollte weiter feststellen, woraus sich die Harmonie der Weltordnung ergibt. Deshalb befriedig-

ten ihn auch keine noch so ausführlichen und exakten Beschreibungen der quantitativen Wechselbeziehungen zwischen den Elementen der Planetenbahnen. Er suchte eine universelle Harmonie, eine „Sphärenmusik", die alle Naturerscheinungen lenkt. Kepler vermochte nicht die mechanischen Gesetze zu finden, die imstande gewesen wären, die Bewegung der Himmelskörper kausal zu erklären, und sie mit den übrigen Naturerscheinungen zu verbinden. Er kannte weder das Fallgesetz noch das Trägheitsgesetz, aber gerade sie ermöglichten erst eine mechanische Erklärung der verschiedenen Erscheinungen. Bei der Suche nach universellen, die ganze Natur umfassenden Gesetzen kam Kepler auf den Gedanken gewisser harmonischer Zahlenproportionen. Für ihn lenkt die einheitliche Weltharmonie alle Erscheinungen. Wenn man die Gesetze dieser Harmonie in der Bewegung der Himmelskörper auffindet, so vermag man dadurch, die dieser Harmonie untergeordneten irdischen Erscheinungen bis zu den historischen Ereignissen und den Schicksalen einzelner Menschen vorauszusehen. Hier liegen die Quellen für die astrologischen Tendenzen in Keplers Weltanschauung. Er beschäftigte sich allerdings auch deshalb soviel mit der Astrologie, weil sie vom deutschen Kaiser und später von Wallenstein besser als astronomische Beobachtungen honoriert wurde. Aber darauf läßt sich nicht alles reduzieren. In Keplers Weltanschauung wurde der Gedanke einer mechanischen Welterklärung der mittelalterlichen Mystik noch nicht entschieden und konsequent entgegengesetzt. Die historische Beschränktheit der Kenntnisse Keplers zeigte sich in dunklen Träumereien. Sie verbargen den rationalen Charakter seiner Gesetze vor vielen, teilweise sogar vor Galilei. Aber insgesamt war Keplers Streben nach einer dynamischen Erklärung der Planetenbewegung durchaus nicht mittelalterlich. Es weist eindeutig Anklänge an die moderne Wissenschaft auf. Keplers Gesetze wurden der Ausgangspunkt für die Himmelsmechanik der Neuzeit.

Keplers astronomisches Erstlingswerk „Mysterium cosmographicum" (1596) setzte sich zum Ziel, das kopernikanische Weltbild mit Hilfe eines geometrischen Schemas regelmäßiger Polyeder zu beweisen. Kepler wollte ergründen, weshalb sich nur sechs Planeten um die Sonne bewegen und weshalb diese Planeten gerade diese und keine anderen Bahnen haben. Von einer evolutionären Auffassung des Kosmos war Kepler jedoch weit entfernt. Die Frage nach den Ursachen, die die Entfernungen zwischen den Planeten bewirken, war ihrem Wesen nach an die Zukunft gerichtet. Es ist eine jener Fragen, die die Wissenschaft der Vergangenheit mit der der Zukunft verbinden.

Die Lösung dieses Problems ist in Keplers Arbeit mittelalterlichen, mystischen Gedankenkonstruktionen untergeordnet. Verbale scholastische Spekulationen im pythagoräischen Sinne, Vorstellungen von der „Seele" der Himmelskörper füllen die Seiten des „Mysterium cosmographicum". Der Inhalt dieses Buches ist sehr kompliziert und widersprüchlich. Kepler beschäftigt sich hier hauptsächlich mit dem geometrischen Gesetz, das die Entfernungen zwischen den Planetenbahnen bestimmt.

Kepler schrieb: „Die Erdbahn liefert die Sphäre, die das Maß aller übrigen ist. Um diese Sphäre beschreibe ein Dodekaeder. In der Sphäre, welche dieses umschließt, liegt die Bahn des Mars. Um die Marssphäre beschreibe man ein Tetraeder. Eine diesem Körper umschriebene Kugelfläche würde die Bahn des Jupiters ent-

halten. Letztere umschließe mit einem Würfel; die umschriebene Sphäre enthält die Bahn des Saturn. Ferner errichte innerhalb der irdischen Sphäre ein Ikosaeder, die demselben eingeschriebene Kugelfläche enthält die Bahn der Venus. Beschreibt man innerhalb ihrer Sphäre ein Oktaeder, so umschließt das letztere die Sphäre des Merkur."[6] Durch die fünf aufgezählten Vielecke werden die regulären Figuren erschöpft, die die sechs Kugelflächen ein- bzw. umschreiben. Somit kann es nach Keplers Meinung auch nur sechs Planeten geben. Zur Zeit Keplers waren auch nur sechs Planeten bekannt: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn. Zwischen ihren Sphären siedelte Kepler die fünf regelmäßigen Vielecke an.

Vom Altertum bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts meinte man in der Physik von der Bewegung, sie sei von „etwas" auf „etwas" gerichtet. Dabei war dieses „etwas" in endliche Intervalle geteilt. Man betrachtete die Bewegung nicht von einem Punkt zu einem benachbarten in Aufeinanderfolge von unendlich kleinen Intervallen, sondern integral. Der Fall der Körper wird bei Aristoteles nicht durch das Differentialgesetz bestimmt, in dem eine augenblickliche Geschwindigkeit und Beschleunigung figuriert, sondern durch das integrale Schema natürlicher Orte, zu denen die schweren Körper streben. In Kreisbahnen wird die Bewegung der Körper nicht durch das Differentialgesetz der Gleichheit momentaner absoluter Geschwindigkeiten wie bei Galilei (der übrigens auch in dieser Frage am Traditionellen anschließt) bestimmt, sondern durch die „Vollkommenheit" der Kreisbahnen.

Da das Integral ein Grenzwert unendlich kleiner Größen ist, vermittelt der Ausdruck „Integralvorstellung" den Sinn der aristotelischen Bewegungsauffassung nicht ganz exakt. Aber eine Vorstellung, die nicht in Punkte und Zeitmomente gegliedert ist, verweist historisch gesehen auf die Zukunft, und in diesem Sinne kann man auch dem viel später aufkommenden Begriff des Integralgesetzes näherkommen.

Kepler stellte integrale Gesetzmäßigkeiten der Bewegung auf, aus denen sich die Differentialvorstellung der Bewegung unmittelbar als Folge ergab. Sind die Planetenbahnen Ellipsen, so verändert sich ihr Krümmungsradius von Punkt zu Punkt. Nach den Keplerschen Gesetzen verändert sich auch die absolute Geschwindigkeit der Planeten. Aber Kepler vollzog den folgenden Schritt nicht selbst. Er fand nicht die wirklichen Gesetzmäßigkeiten, die die Planetenbewegung von Punkt zu Punkt und von Augenblick zu Augenblick bestimmen.

Für die Erarbeitung der Keplerschen Gesetze hatte der Unterschied der im „Mysterium cosmographicum" beschriebenen Bahnen zu den in Kopernikus' Buch erwähnten entscheidende Bedeutung. Nachdem Kepler dies festgestellt hatte, begann er die von Kopernikus mitgeteilten Fakten systematisch zu überprüfen. Dies war eine titanenhafte Arbeit, und sie führte zur Entdeckung der Gesetze der Himmelsmechanik.

[6] J. Kepler, Prodromus dissertationum cosmographicarum continens Mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium, Tübingen 1596, zit. nach: F. Dannemann, Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhange, II. Bd., Leipzig 1921, S. 117f.

Zunächst berichtigte Kepler die Auffassungen des Kopernikus über das Weltzentrum. Im kopernikanischen System befand sich das Weltzentrum nicht in der Sonne, sondern in einem idealen Punkt, im Mittelpunkt der Erdbahn. Kepler behauptete, das Zentrum der Erdbahn, das sich in einer Entfernung von der Sonne befindet, die der Exzentrizität der Erdbahn gleich sei, könne nicht das tatsächliche Zentrum des Weltalls sein. Überhaupt drehen sich bei Kepler die Himmelskörper, wie wir gesehen haben, nicht um mathematische Punkte, sondern um physikalische Körper. Diese Auffassung steht mit den dynamischen Tendenzen Keplers in engem Zusammenhang. Von diesen Ideen geleitet, kam Kepler zur Vorstellung von der Bewegung der Planeten in Ellipsen mit der Sonne als einem ihrer Brennpunkte.

Nach dem „Mysterium cosmographicum" wurde die Überprüfung der Himmelsmechanik, die Kopernikus nicht untersucht hatte, zum Lebensziel Johannes Keplers, d. h. die Theorie der Epizyklen und der gleichförmigen Kreisbewegung, ihre Ersetzung durch die neue Lehre von der ungleichförmigen elliptischen Planetenbewegung. Diese Aufgabe wurde mit Hilfe der Beobachtungen Tycho de Brahes und Keplers eigenen Beobachtungen gelöst. Auf der Grundlage seiner nach Umfang und Schwierigkeitsgrad kaum vorstellbaren Arbeit zeigte Kepler, daß sich der Mars auf einer elliptischen Bahn bewegt. Kepler zog diesen Schluß in seiner bedeutsamen „Neuen Astronomie", die 1609 erschien. Das Titelblatt des Buches lautet: „Neve Astronomie mit Beweisführung oder Physik des Himmels dargestellt in Abhandlungen über die Bewegungen des Sternes Mars. Nach den Beobachtungen des Tycho Brahe. Auf Befehl und Kosten Rudolfs II. ... Römischen Kaisers ... in mehrjähriger rastloser Arbeit verfaßt zu Prag von Sr. Heil. Kais. Maj. Mathematiker Johannes Kepler."

In diesem Buche wurde das erste und zweite Keplersche Gesetz dargelegt. Das zweite Keplersche Gesetz entsprang wie das erste physikalischen Ideen. Kepler ging in seiner Kinematik von bestimmten physikalischen Hypothesen aus — wie auch Newton 50 bis 80 Jahre später. Allerdings verbarg Kepler die seinen Gesetzen zugrunde liegenden physikalischen Hypothesen nicht. Aus der Identifizierung der bewegenden Kraft der Sonne mit einem sich in der Fläche ausbreitenden Magnetismus ergibt sich eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Anziehungskraft der Sonne und der Entfernung. Daraus folgt: Ein von der Anziehungskraft der Sonne erfaßter Planet bewegt sich mit einer Geschwindigkeit auf seiner elliptischen Bahn, die dem Abstand von der Sonne umgekehrt proportional ist. Je mehr sich der Planet entfernt, desto langsamer bewegt er sich, und dementsprechend wird eine größere Zeit benötigt, um eine bestimmte Entfernung zurückzulegen.

In diesem Teil der Bahn ist der Planet am weitesten von der Sonne entfernt, folglich ist auch der Radiusvektor größer. Wenn sich also der Planet dem Punkte der maximalen Entfernung von der Sonne nähert, wächst der Radiusvektor, und die Geschwindigkeit nimmt in gleicher Proportion ab. Folglich wächst die Zeit proportional der Länge des Radiusvektors.

Das dritte Keplersche Gesetz wurde in seinem Buch „Harmonices mundi" („Weltharmonie") entwickelt (1619). Kepler hielt diese Schrift für eine Fortsetzung des „Mysterium cosmographicum". Hier wird auch erneut die Frage nach

den Entfernungen der Planeten von der Sonne, nach der Geometrie der Planetenbahnen aufgeworfen. Allerdings geht es in der „Weltharmonie" um die mittleren Entfernungen, da sich die Bahnen als elliptisch erwiesen hatten. Außerdem geht Kepler hier, im Unterschied zum „Mysterium cosmographicum", über die Geometrie hinaus und verbindet die Entfernung der Planeten von der Sonne mit ihren Umlaufzeiten. Dies ist eine sehr wichtige Etappe in der Genesis der modernen Wissenschaft.

Albert Einstein hat einmal geäußert, ihn würde interessieren, ob die Welt auch auf eine andere Weise hätte geschaffen werden können, als sie tatsächlich geschaffen wurde, ob die Weltkonstanten nicht empirisch bestimmt sind, ob man sie eindeutig aus einem bestimmten einheitlichen Prozeß entwickeln könne. Diese Frage stellte sich auch Kepler. Von ihrer Beantwortung hängt es ab, wie die Weltkonstanten abgeleitet und ihres empirischen Charakters entkleidet werden können. Die mittleren Radien der Planetenbahnen waren für Kepler solche Weltkonstanten. Einsteins Frage ist auch heute noch nicht beantwortet. Schon im 17. Jahrhundert veränderte sich die Stellung dieser Frage grundlegend. Die konkrete Weltstruktur wurde zunächst (bei den Peripatetikern und im „Mysterium cosmographicum") durch dieses oder jenes *statische, rein räumliche Schema*, dann aber (in Keplers „Weltharmonie" und bei Galilei) durch ein *kinematisches Schema*, durch ein Modell der *Bewegungen* der Himmelskörper erklärt. Wir werden auf diesen Übergang bei Darlegung der Auffassungen Galileis noch zurückkommen.

In den Jahren 1618 bis 1621 erschien Keplers „Epitomes astronomiae Copernicanae", eine systematische Darlegung des gesamten astronomischen Lehrgebäudes. Hierin werden die bei Beobachtung des Mars gefundenen Gesetze verallgemeinernd auf die Bewegung aller Planeten und ihrer Trabanten angewandt. In diesem Buche finden sich bedeutend weniger mystische Auffassungen als in Keplers früheren Arbeiten. Um so interessanter ist folgende Tatsache. Kepler untersucht das Problem der absoluten Entfernung zwischen den Planeten und der Sonne. Dabei geht er von folgendem Gedanken aus. Die Erde ist Aufenthaltsort von Wesen, die Messungen vornehmen können. Folglich müssen ihre Maße das natürliche Maß der kosmischen Entfernungen und der Größen der kosmischen Körper sein. Deshalb muß das Volumen der Sonne um sovielmal das der Erde übertreffen, als die Entfernung zur Sonne den Erdradius übersteigt. Hier begegnen wir wiederum Keplers Tendenz, irgendeinen Zusammenhang zwischen den kosmischen Konstanten zu finden. Den Gedanken von der Natur, die danach strebt, die Forschung zu vereinfachen und zu erleichtern, finden wir später auch bei Galilei, allerdings in bedeutend rationalisierterer Form. Bei Galilei gehören derartige Überlegungen zum Gerüst seiner mechanisch-kausalen Untersuchungen. Bei Kepler gehen diese Elemente kausaler Untersuchungen hingegen in mittelalterlichen Phantasien unter. Für das logische System der wissenschaftlichen Entwicklung sind diese Phantasien unwesentlich, für die Geschichte der Naturwissenschaft als eines gesellschaftlichen Prozesses hingegen sehr bedeutsam. Kepler vermochte auf den Charakter des wissenschaftlichen Denkens, auf das Verhältnis zur Natur und ihre Untersuchung nicht den Einfluß auszuüben wie Galilei, der Begründer der mechanischen Naturwissenschaft. Aber Keplers Entdeckungen sind in den historisch invarianten Inhalt der neuen Mechanik eingegangen.

4. Die Weltanschauung Galileis

Galileis wissenschaftlich-technische Interessen wurden durch seine Umwelt hervorgerufen und entwickelten sich von seiner frühesten Jugend an. Sein Lehrer war Ostilio Ricci, ein heute weitgehend vergessener Vertreter der angewandten Mechanik und Mathematik des 16. Jahrhunderts. Ricci unterrichtete die Söhne bekannter Florentiner Familien in den Künsten und in Ingenieurtechnik. In der Florentinischen Nationalbibliothek sind 23 Blätter mit Vorlesungsnachschriften erhalten geblieben, die zeigen, womit sich der junge Galilei bei Ricci beschäftigte. Ricci machte Galilei mit Problemen der praktischen Mechanik und angewandten Mathematik bekannt. Er entwickelte das offenbar bei Galilei schon vorhandene Interesse an der Technik, das schon seine frühen Biographen hervorheben.

Unter Riccis Anleitung beschäftigte sich Galilei mit dem Kriegsingenieurwesen, studierte den Bau von Festungen und von Wasserleitungen, die Flußregulierungen und den Florentiner Straßenbau. Später schrieb Galilei selbst zwei Abhandlungen über die Befestigungskunst. Im Jahre 1610 kündigte er eine Reihe von Büchern an, die der Unterweisung in der Befestigungslehre und anderen Bereichen des Kriegswesens, verbunden mit der praktischen Anwendung mechanisch-mathematischer Kenntnisse, dienen sollten.

Für artilleristische und kriegstechnische Probleme hegte Galilei stets wissenschaftliche Interessen. Später gesellten sich dazu noch Ambitionen zur Hydrotechnik. Überhaupt ist es leicht, die produktionstechnischen Wurzeln von Galileis Schaffen aufzudecken. Aber damit erschöpfen sich die Quellen seiner Weltanschauung und seiner Entdeckungen nicht. Von Gedanken aus der angewandten Mechanik irdischer Körper kam Galilei zur Beschäftigung mit Problemen des Kosmos. Freilich ist hierbei folgender Vorbehalt zu machen: Galilei hat nicht etwa die Mechanik irdischer Körper mit der Himmelsmechanik vereinigt. Dies war erst eine Leistung Newtons. Bei Galilei fehlten dafür noch solche notwendigen Voraussetzungen wie der Begriff der geradlinigen Inertialbewegung und das Gesetz der Schwerkraft. Aber Galilei hat beim Studium des Kosmos eine neue, mit der Technik angereicherte Methode des wissenschaftlichen Denkens angewendet und ein Beispiel für den neuen Stil in der wissenschaftlichen Forschung gegeben.

Er verkündete die Souveränität der Kausalität in der Wissenschaft. Sicherlich, er hat manchmal darauf verzichtet, einige Erscheinungen erklären zu wollen, die damals physikalisch noch nicht exakt zu fassen waren. Demgemäß wollte er sich auf Untersuchungen der Gesetze der Erscheinungen beschränken, ohne bis zu ihren Ursachen vorzudringen. Aber die kausale Erklärung der Natur ist für Galilei stets die Hauptaufgabe gewesen. Bisweilen schränkte er die wissenschaftliche Forschung durch die Lehre von der doppelten Wahrheit ein. Diese trennte Theologie und Wissenschaft in zwei verschiedene Bereiche, wonach sich die Theologie nicht in wissenschaftliche Fragen einzumischen und die Wissenschaft ihre Schlüsse nicht der Theologie aufzudrängen hatte. Diese Form des Kompromisses zwischen Wissenschaft und Religion hat mit dem Konditionalismus Osianders nichts gemein. Die Wissenschaftler setzten, wenn sie vom Doppel-

charakter der Wahrheit sprachen, nicht voraus, daß es die Wissenschaft mit fiktiven Objekten zu tun habe. Sie behaupteten vielmehr, die Ergebnisse der Wissenschaft seien objektive Wahrheit. Der Sinn der Lehre von der doppelten Wahrheit ist darin zu sehen, daß die Wissenschaft ihren Bereich von dem Gebiet trennte, in dem das kirchliche Dogma herrschte. Jedenfalls muß sich die Wissenschaft nach Galileis Auffassung dem Kausalitätsprinzip unterordnen. Galilei führte den Gedanken der unendlichen Annäherung an die objektive Wahrheit auf der Grundlage der mechanischen Naturerklärung in das wissenschaftliche Bewußtsein ein.

Die Unendlichkeit der Erkenntnis ergibt sich bei Galilei aus der Unendlichkeit der Natur. An seinem Lebensabend verwies Galilei, das Fazit seiner astronomischen Arbeiten ziehend, auf die enorme Ausweitung der Erkenntnisbereiche des Weltalls. Tatsächlich bezeichneten die Entdeckungen des Teleskops und die Grundgedanken Galileis einen entschiedenen Umschwung in der Weltanschauung: Die unendliche, grenzenlose Natur wurde zum Gegenstand der Wissenschaft und nicht zum Gegenstand naturphilosophischer Mutmaßungen und scholastischer Konstruktionen. Am 2. Januar 1638 schrieb Galilei, auf seine Blindheit eingehend, an Diodati: „... Euer ergebener Freund und Diener, ist seit einem Monate völlig und unheilbar blind; so zwar, daß dieser Himmel, diese Erde, dieses Weltall, welche ich mit meinen merkwürdigen Beobachtungen und klaren Darlegungen hundert-, ja tausendfach über die von den Gelehrten aller früheren Jahrhunderte allgemein angenommenen Grenzen erweitert habe, nun für mich auf einen so engen Raum zusammengeschrumpft sind, daß derselbe nicht über jenen hinausreicht, den mein Körper einnimmt.“[7]

Vor Galilei eröffnete sich ein unendliches Forschungsfeld. Wir können allerdings Olschki nicht zustimmen, der die Meinung vertritt, die Unendlichkeit der Wissenschaft rufe notwendig ein Gefühl der Depression hervor: „Für diejenigen, die auf den letzten Grund der Dinge zu schauen gewohnt waren, erschloß Galilei undurchdringliche Welträtsel und eine unendlich in Zeit und Raum ausgedehnte Wissenschaft, deren Grenzenlosigkeit zum Gefühl und Bewußtsein menschlicher Einsamkeit und Hilflosigkeit führen mußte.“[8]

Es geht nicht um die subjektiven Empfindungen und Stimmungen des heutigen Gelehrten, der das Fehlen endgültiger Lösungen in der Wissenschaft erkennt. Ein Wissenschaftler, der seine Tätigkeit mit dem alles besiegenden und unendlichen gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Fortschritt in Verbindung bringt, verspürt durchaus nicht das Gefühl der Einsamkeit und Hilflosigkeit. Die Unendlichkeit der Erkenntnisse war in der Weltanschauung Galileis Quelle eines tiefen und eindrucksvollen Optimismus. An seine zahlreichen Zuhörer, Leser und Korrespondenten gewandt, sagte Galilei, die Wissenschaft sei nicht die Summe ein für allemal festgelegter Dogmen, sondern ein bis in die Unendlichkeit reichender Prozeß. Nach Galilei besitzen wir nur einen geringen Teil der Wahrheit, und die Natur eröffnet uns ein grenzenloses Feld für weitere Forschungen. Galilei sprach

[7] Zit. nach: K. von Gebler, Galileo Galilei und die Römische Curie, Bd. I, Stuttgart 1876, S. 346 bis 347.

[8] L. Olschki, Geschichte der neusprachlichen wissenschaftlichen Literatur, III. Band, Galilei und seine Zeit, Halle/S. 1927, S. 118–119.

darüber voller Gelassenheit und Freude. Er behauptete die absolute Objektivität der wissenschaftlichen Wahrheit. Wir haben nur wenige Kenntnisse, aber sie entsprechen der objektiven Wirklichkeit und werden auf der Grundlage einer einfachen, rationalen und allen Menschen zugänglichen wissenschaftlichen Methode bereichert und präzisiert.

Galileis Gegner erklärten entweder die sichtbare (geozentrische) Bewegung für absolute Realität, oder sie leugneten überhaupt den objektiven Charakter der wissenschaftlichen Gesetze. In der metaphysischen Auffassung war die Wissenschaft entweder Summe endgültiger Dogmen oder eine Kette von Irrtümern, die nur relativen Wert besaßen. Beide Konzeptionen können Grundlage eines tiefen Pessimismus hinsichtlich der Perspektiven der *wissenschaftlichen* Entwicklung sein. Galilei propagiert hingegen den alles besiegenden grenzenlosen wissenschaftlichen Fortschritt, der unendlich wie die Natur selbst ist. Nach Galilei wird der menschliche Verstand extensiv, d. h. hinsichtlich der Wissensmenge, immer nur einen unendlich kleinen Teil der Wahrheit erfassen, da die Natur unendlich, das Wissen aber endlich ist. Intensiv hingegen, d. h. nach dem Grad ihrer objektiven Zuverlässigkeit, vermag der Verstand die Natur absolut zu erfassen. Dieser Gedanke wird in den Inquisitionsakten des Galileiprozesses von 1633 als besonders verwerflich bezeichnet. Er wird von Galilei in folgenden Worten geäußert, die, wie man ohne weiteres sagen kann, in der Wissenschaftsgeschichte des 17. Jahrhunderts keine Analogie haben. „Extensive, d. h. bezüglich der Menge der zu begreifenden Dinge, deren Zahl unendlich ist, ist der menschliche Verstand gleich nichts, hätte er auch tausend Wahrheiten erkannt, ... nimmt man aber das Verstehen intensive, so behaupte ich, daß der menschliche Intellekt einige Wahrheiten so vollkommen begreift und ihrer so unbedingt gewiß ist, wie es nur die Natur selbst kann.“[9]

Wie Galilei weiter ausführte, gehören hierher die rein mathematischen Erkenntnisse. Er sagt: „Freilich erkennt der göttliche Geist unendlich viel mehr mathematische Wahrheiten, denn er erkennt sie alle. Die Erkenntnis der wenigen aber, welche der menschliche Geist begreift, kommt meiner Meinung an objektiver Gewißheit der göttlichen Erkenntnis gleich, denn sie gelangt bis zur Einsicht ihrer Notwendigkeit und eine höhere Stufe der Gewißheit kann es wohl nicht geben.“[10]

Objektive Ursache der Naturerscheinungen ist bei Galilei die einheitliche, mit sich selbst identische, keine sekundären, qualitativen Eigenschaften besitzende Materie. Dieser Gedanke ist bei all seiner Beschränktheit im 17. Jahrhundert fortschrittlich. Er richtete sich gegen die qualitativen Erklärungen der Peripatetiker, Diese bildeten nach Galilei nur rein verbale Bezeichnungen, die uns der Erkenntnis der Ursachen nicht näher brachten. Die mittelalterlichen Aristotelesepigonen nahmen bei jeder Begegnung mit unbekannten Erscheinungen die Existenz einer spezifischen Qualität an, deren Fähigkeit es gerade sei, diese Erscheinung hervorzubringen. Nach Galileis Worten reduziert die Methode der Aristoteliker die

[9] G. Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, aus dem Ital. übers. u. erl. v. E.S trauß, Leipzig 1891, S. 108.
[10] Ebenda.

Wissenschaft auf das Erfinden neuer Worte, wobei diese Worte keine Probleme lösen, sondern sie nur bezeichnen.

Spätere Generationen begegneten den Resten der scholastischen Theorien mit dem Gespött Molières, der einen scholastischen Baccalaureus sagen läßt: „Gefragt ward ich vom Doco doctore

> Nach der causa und der ratio, warum
> Zum Schlafen führt das Opium.
> Worauf ich denn respondeo:
> Es wohnet eben in eo
> Ein etwas, das zum Schlafen führt;
> Anders gesagt: sein Wesen ist,
> Daß es den Sinn im Schlaf verschließt."[11]

Wirkliche Erklärungen von Naturerscheinungen müssen nach Galilei die Bewegung der qualitätslosen einheitlichen Materie erkennen lassen. Infolge der Lage der Wissenschaft des 16. und 17. Jahrhunderts konnte die Einheit der Welt nur als mechanische Einheit gesehen werden. Anstelle von qualitativen Unterschieden wurden in die wissenschaftliche Weltanschauung rein quantitative Unterschiede zwischen den ihrer Natur und ihren Eigenschaften nach identischen Elementen eingeführt. Außerdem mußte die gesamte Wissenschaft alle Naturerscheinungen einem quantitativen Prozeß unterordnen, der Ortsveränderung qualitativ gleichartiger Elemente.

Diese Tendenz fand in Descartes' Physik ihre Fortsetzung. Sie war schon bei Kepler vorhanden, wenngleich dieser in seinen naturphilosophischen Auffassungen in vielerlei Hinsicht im Banne mittelalterlicher Ideen stand. Kepler schrieb: „Dort, wo Aristoteles zwischen zwei Dingen einen direkten Gegensatz erblickt, der der Vermittlungsglieder entbehrt, dort finde ich, der die Geometrie philosophisch behandle, einen vermittelten Gegensatz; so daß dort, wo bei Aristoteles der eine Terminus ‚anderes' (aliud), bei uns die zwei Termini ‚mehr' und ‚weniger' (plus et minus) stehen."[12]

Die mechanische Naturwissenschaft wandte sich nicht nur gegen die verborgenen Qualitäten der Scholastiker, sondern im wesentlichen auch gegen alle qualitativen Unterschiede in der Natur, die sie auf rein quantitative zurückführte. Galilei ging dabei viel weiter als Kepler. In seiner Materieauffassung und in seinen astronomischen Ansichten lehnte er eine qualitative Begrenzung der Elemente des Stoffes ab. In seiner Schrift „Die Goldwaage" (Il Saggiatore) schrieb er: „Niemals werde ich von den äußeren Körpern etwa anderes fordern, als Größe, Figur, Quantität und mehr oder weniger schnelle Bewegungen, um die Entstehung der Geschmacks-, Gehör- und Schallempfindungen zu erklären. Ich meine, wenn wir die Ohren, Sprache und Nase beseitigen würden, so blieben nur Figuren, Zahlen und Bewegungen, nicht aber Geschmack, Gehör und Ton. Sie sind nach meiner Meinung außerhalb der Lebewesen nur leere Namen."[13]

[11] Molière, Der eingebildete Kranke, in: Molière, Werke, Leipzig 1968, S. 1074.

[12] J. Kepler, De fundamentis astrologiae certioribus ..., in: Opera omnia, vol. 1, Frankfurt/Erlangen 1858, S. 423.

[13] G. Galilei, Il. Saggiatore, in: Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale, Vol. VI, Firenze 1896, S. 350.

Galilei äußert weiter einen historisch höchst bedeutsamen Gedanken, in dem sich die Wurzeln der wichtigsten wissenschaftlichen Ideen des 17. Jahrhunderts verflechten: die Unzerstörbarkeit des Stoffes, die Einheitlichkeit der Materie und die Reduzierung der qualitativen Unterschiede auf Konfigurationen von Materieelementen. Er schreibt: „Ich habe nirgends eine solche Umwandlung von Stoffen in andere feststellen können, bei der ein Körper offensichtlich vernichtet wird und aus ihm ein anderer, vom ersten völlig verschiedener Körper entsteht. Ich halte es für möglich, daß sich die Umwandlung einfach auf die Veränderung der wechselseitigen Anordnung der Teile reduziert, wobei nichts Neues entsteht und nichts vernichtet wird."[14]

Die literarische Form der Werke Galileis hat zu seinen wissenschaftlichen Ideen unmittelbaren Bezug. Galilei ist einer der Schöpfer der klassischen italienischen Prosa. Dies wird einerseits durch die spezifischen Entwicklungswege der italienischen Wissenschaft des 17. Jahrhunderts, andererseits durch die spezifischen Entwicklungslinien der Kunstprosa jener Zeit erklärt. Galilei wandte sich entschieden gegen die Sammlung und Wiedergabe von Dokumenten, die in Werken der Antike und der Kirchenväter enthalten waren. Er legte der Wissenschaft die Beobachtung und die selbständige Analyse der Naturerscheinungen zugrunde. Die künstlerische Rhetorik, die traditionelle Ausdrucksform traditioneller Gedanken, mußte nunmehr der lebendigen und bildhaften Rede des Menschen Platz machen.

Galilei verhielt sich gleich anderen wissenschaftlichen und künstlerischen Neuerern wie ein erster Beobachter, der die traditionellen Auffassungen verwirft und die Welt vor seinen Augen in reinen und neuen Farben aufleuchten läßt. Später verwandelte sich das Bestreben, die Welt ohne vorgefaßte Schemata zu sehen, in einen beschränkten Empirismus, der im 18. und 19. Jahrhundert zur Tradition wurde. Bei Galilei war die Ablehnung apriorischer Schemata aber nicht nur und nicht vorrangig formulierte methodologische Forderung, etwa wie bei Newton die „Regulae philosophandi" zum spezifischen Stil des wissenschaftlichen Schaffens wurden, aus denen sich Klarheit und Deutlichkeit der Sprache ergaben. Der literarische Stil Galileis war auf die Darlegung origineller Ideen gerichtet. Dank Galilei wurden in der italienischen Literatur die inhaltslosen, wortreichen und schwülstigen Perioden durch einen inhaltsreichen exakten Stil ersetzt. Galilei und seine Nachfolger stellten die literarische Form in den Dienst des reichen und neuen Inhalts ihrer Werke.

Galilei hegte keinerlei Sympathie für die in der Literatur seiner Zeit außerordentlich weit verbreiteten Allegorien. Die Allegorie erfaßt die Erscheinungen, ähnlich der Magie, nur äußerlich. Daher finden sich Allegorien in der Alchemie, Astrologie und in der Literatur des Mittelalters überhaupt. Für Athanasius Kircher war zum Beispiel die rote Farbe, das Symbol des purpurnen Gewandes der Herrschenden, Anlaß, um dem in rotes Gewebe gehüllten Magneten erhöhte Kraft zuzuschreiben. Der neuen Naturwissenschaft widersprachen solche äußeren, symbolisch-allegorischen Konstruktionen.

[14] Ebenda.

Galilei brach auch mit einer anderen literarischen Tradition. Die Schriftsteller seiner Zeit liebten es, ihre Werke mit bizarren und weitschweifigen verbalen Ornamenten zu schmücken. Galilei dagegen hielt es für einen Verstoß gegen den guten Geschmack, seine wissenschaftliche Belesenheit zur Schau zu stellen. Die Wissenschaft ist für Galilei nicht Gesamtheit der aus verschiedenen Büchern geschöpften Kenntnisse, sondern exakte und folgerichtige Erklärung von Tatsachen. Daher ist dem Begründer des mechanischen Weltbildes die eklektische Gelehrsamkeit der scholastischen Literatur fremd. Galilei nahm davon Abstand, zufällige, aus alten Büchern gewonnene Beobachtungen, rhetorische Floskeln, äußerliche Ähnlichkeiten usw. aneinanderzureihen, wie dies seine Gegner taten.

Grundlage für Galileis literarischen Stil ist eine neue Art des wissenschaftlichen Denkens. Die Wissenschaft hat es mit dem unendlichen Weltall zu tun und besteht in der unendlichen, niemals auf Endgültigkeit ihrer Ergebnisse Anspruch erhebenden Naturerkenntnis. Deshalb hören die ein für allemal feststehenden Dogmen auf, Inhalt der Wissenschaft zu sein. Gleichzeitig verschwinden damit aus der wissenschaftlichen Literatur die Berufungen auf Autoritäten und das rein literarische Verhältnis zur Wirklichkeit, das im Mittelalter fast unumschränkt herrschte. In der mittelalterlichen Literatur ersetzte die Belesenheit die Forschung. Dem entsprach das Übertragen derselben Formen und Gestalten in andere Bücher. Somit stand Galileis Kampf gegen das Buchwissen und die inhaltlose Geschraubtheit des literarischen Stils mit den Grundideen seiner Weltanschauung im Zusammenhang. Die geheimnisvolle Mystik der Allegorien mußte durch einen exakten und klaren literarischen Stil ersetzt werden, weil die neue Art wissenschaftlichen Denkens in einer rationalen und kausalen Erklärung der Naturerscheinungen bestand. Diese rationale Erklärung war auch den einfachen Menschen zugänglich, die die Sprache der Wissenschaft nicht verstanden. Für das Mittelalter war der Naturaufbau ein göttliches Geheimnis. Es wurde den Menschen durch die Offenbarung und die Kommentare der Kirchenväter vermittelt, die auf alle Fragen der Wissenschaft endgültige Antwort gaben. Für Galilei bestand hingegen die Wissenschaft in der Anwendung der Begriffe auf Naturerscheinungen, die durch die empirische Praxis der Manufakturen gewonnen wurden, in rationalen, dem Verständnis eines beliebigen Menschen zugänglichen Begriffen. Hierin liegen die entscheidenden Wurzeln der Reformen, die Galilei in der wissenschaftlichen Kunstprosa vollzog.

Galileis Stil entspricht einer bestimmten Entwicklungsperiode der Naturwissenschaften, der Periode, da sie um gesellschaftliche Anerkennung kämpft, an neue Gesellschaftskreise appelliert und von einer gesetzmäßigen, systematisierten Form noch weit entfernt ist. Nach Descartes entspricht Galileis Stil seiner Methode: „... er scheint mir dadurch einen großen Fehler zu begehen, daß er fortgesetzt abschweift und niemals dabei verweilt, einen Gegenstand vollständig zu erklären. Das beweist, daß er sie nicht der Reihe nach geprüft und nur die Gründe für einige besondere Wirkungen aufgesucht hat, ohne die ersten Ursachen ihrer Natur betrachtet zu haben, und daß er auf diese Weise ohne Fundament gebaut hat."[15] Das exakte Gebäude der cartesischen Physik, in der aus der Be-

[15] R. Descartes, Brief an Mersenne vom 11. 10. 1638, in: R. Descartes, Briefe 1629–1650, Köln/Krefeld 1949, S. 137.

wegung der Materie systematisch, zum Teil mit Hilfe phantastischer Hypothesen, alle Details des Weltgebäudes entwickelt werden, war für die Cartesianer Beweis der Wahrheit der mechanischen Naturerklärung. Die lebendigen Arabesken Galileis erfüllten eine andere historische Aufgabe.

Nehmen wir seinen „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme". Zunächst werden Vorurteile gegen die tägliche Erdrotation beseitigt, dann wird die jährliche Bewegung der Erde bewiesen, das kopernikanische System dargelegt, und schließlich wird der Leser zur widerspruchslosen Anerkennung des kopernikanischen Systems geführt. Galilei führt den nach seiner Meinung überzeugendsten Beweis, die Theorie der Gezeiten, an.

Im „Dialog" gibt es noch Abschweifungen, die sich in den späteren Werken nicht mehr finden. Wir wollen nur an den Anfang des dritten Tages denken, da der einfältige Simplicio berichtet, wie er auf dem Wege zum Palast des Sagredo mit seiner Gondel wegen der Ebbe in einem Kanale auf dem Trocknen steckenblieb. Die humorvolle Darstellung des atemlosen Simplicio, die prekäre Situation (den Peripatetiker hatte eine Erscheinung festgehalten, die seine Ideen widerlegte), der ruhige, leicht spöttische Ton Sagredos und Salviatis, die über Simplicio während der Zeit sprechen, da dieser auf die Flut warten mußte, all das schafft das Verhältnis zu Simplicio, das Galilei braucht, um den psychologischen Unterton des „Dialogs" zu entwickeln. Nach dieser Episode ändert sich der Charakter des Gesprächs, sein Schwerpunkt verschiebt sich auf positive Darlegungen.

Aus Inhalt und historischen Aufgaben der Arbeiten Galileis entspringt die populäre Darstellung. In den verschlüsselten Handwerksrezepturen, in Astrologie, Alchimie, in der mittelalterlichen Magie, in den verborgenen Qualitäten der mittelalterlichen Peripatetiker schwangen Geheimnisse mit. Dementsprechend war auch die Sprache der Alchimie, der Astrologie und der gesamten orthodoxen mittelalterlichen Literatur voller Geheimnisse. Die mechanische Naturwissenschaft verkündete hingegen die Erkennbarkeit der Natur, sie wandte sich gegen verborgene Qualitäten und erklärte die Erscheinungen durch klare mechanische Analogien, die der Praxis, der Technik, der irdischen Welt der Rollen, der Mühlenräder und der technischen Ausrüstungen der Manufakturen entnommen waren; einer Welt also, die auch die Laien, die einfachen Menschen verstanden. Die Klarheit wurde zu einer Forderung der mechanischen Naturwissenschaft.

Ein großer Teil der Arbeiten Galileis wurde in der Volkssprache geschrieben. Galilei sagte, daß er aus zweierlei Gründen italienisch schreibe: einmal, damit jeder Mensch seine Bücher lesen könne, zum zweiten, um die Erfaßbarkeit der Welt durch den menschlichen Verstand der einfachen Menschen zu demonstrieren, die an den Früchten der Scholastik keinen Gefallen gefunden hatten.

5. *Der „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme"*

Die größte gesellschaftliche Resonanz erweckten die astronomischen Arbeiten Galileis. Galilei wurde in Italien und ganz Europa durch seine Entdeckung der Jupitermonde, der Mondkrater, durch die Entdeckung, daß die Milchstraße aus

Sternen besteht, die Entdeckung der Venusphasen und der Sonnenflecken sehr bekannt. Der Begründer der mechanischen Weltauffassung bediente sich bei seinen Beobachtungen des Teleskops, das im ersten Jahrzehnt des 17. Jahrhunderts in Holland erfunden worden war.

In der Nacht zum 7. Januar 1610 wurde das Teleskop erstmalig auf den Sternenhimmel gerichtet. Galilei sah die Mondkrater und Mondgebirge, erblickte die die Milchstraße bildende unendliche Sternenanhäufung. Sie war den Menschen bislang als ein kompaktes leuchtendes Band erschienen. Galilei sah außerdem in der Nähe des Jupiters kleine Sterne, die sich in der darauffolgenden Nacht verschoben hatten und sich als Jupitertrabanten erwiesen. Am Morgen des 7. Januar teilte Galilei seine Entdeckungen dem Florentiner Herzog mit. Bald darauf begann er seinen „Sidereus nuntius" (Himmelsboten) zu schreiben, der zwei Monate später in Venedig veröffentlicht wurde. In dieser Arbeit wird die Mondlandschaft beschrieben, wie sie Galilei sah, als er sein Teleskop auf den Erdtrabanten richtete. Galilei schrieb, eine ganze Armee von Philosophen habe den Mond für völlig sphärisch und glatt gehalten. Das Teleskop habe hingegen erwiesen, daß seine Oberfläche ungleichmäßig, uneben, mit Tälern und Bergen dicht bedeckt sei und sich in dieser Hinsicht nicht von der Erde unterscheidet. Galilei berichtete weiter, mit Hilfe des Teleskops habe er zehnmal mehr Sterne beobachtet, als er mit dem bloßen Auge zu sehen vermocht hatte. Voller Ironie erinnerte der Gelehrte an die scholastischen Diskussionen über das Wesen der Milchstraße. Er wies nach, daß sie eine Anhäufung von unzähligen Sternen darstellt. Galilei betonte, der gewöhnliche menschliche Verstand vermöge mit Hilfe des Teleskops eine absolut zuverlässige Vorstellung vom Aufbau der Sternenwelt zu gewinnen, ohne die feinen Wortklaubereien der Scholastiker zu kennen. Dieser Ton wird im „Himmelsboten" oft angeschlagen. Abschließend berichtet Galilei von der Entdeckung der Jupitertrabanten.

Alle diese Entdeckungen halfen bei der Verbreitung und beim physikalischen Verständnis des kopernikanischen Systems. Nehmen wir zum Beispiel die Mondbeobachtungen. Das Bild der Mondoberfläche war für eine wissenschaftliche Weltanschauung von prinzipieller Bedeutung. Die traditionelle Auffassung ließ keine Ähnlichkeit zwischen Erde und Himmelskörpern zu. Das System des Kopernikus machte hingegen die Erde und die anderen Planeten ähnlich, da es allen Planeten die gleiche Bewegung, die Bewegung um die Sonne zuschrieb. Aber das kopernikanische System lehrte nicht nur diese mechanische, richtiger kinematische Ähnlichkeit zwischen der Erde und den übrigen Himmelskörpern. Es gab dabei noch eine physikalische Seite. Sie wurde von der zweiten Generation von Kopernikusanhängern, so von Giordano Bruno, gesehen. Es entwickelte sich der Gedanke von der Identität der physikalischen Natur der Erde und der übrigen Himmelskörper. Er blieb so lange naturphilosophische Spekulation, bis Galilei mit dem Teleskop die Mondoberfläche gesehen hatte, die sich als der irdischen Landschaft ähnlich erwies. Diese Beobachtung Galileis war ein so ansehnlicher Beweis für die physikalische Identität von Erde und Himmelskörpern, wie es ihn vor Galilei in der Astronomie nicht gegeben hatte. Hier ging es nicht um irgendwelche mathematischen Berechnungen, sondern um eine unmittelbare Beobachtung der Himmelskörper.

Natürlich war dieser Beweis nicht nur auf Gelehrte zugeschnitten, sondern auf einen größeren Kreis von Menschen, deren naturwissenschaftliche Vorstellungen mit den gesellschaftlichen Ideen und dem gesellschaftlichen Kampf in engem Zusammenhang standen. Vermag ein jeder Mensch, unabhängig von seiner mathematischen und astronomischen Vorbildung, mit Hilfe des Teleskops festzustellen, daß sich der Mond, ein Himmelskörper, prinzipiell nicht von der „sündigen" Erde unterscheidet, so entfällt das geheiligte Prinzip der Überhöhung des Himmels gegenüber der Erde, und damit werden die von der Kirche aus diesem Prinzip gezogenen religiösen, moralischen und politischen Schlüsse unhaltbar.

Dies ist das positive, das eigentlich wissenschaftliche Problem dieser Beobachtung Galileis. Die physikalischen Beweise des heliozentrischen Weltbildes, der Gedanke einer physikalischen Gleichartigkeit von Himmel und Erde, die Idee der Unterordnung der Bewegung irdischer Gegenstände und der Himmelskörper unter die gleichen Gesetze — all dies war Grundlage des einheitlichen wissenschaftlichen Weltbildes. Seine Herausbildung fällt mit dem Beginn der modernen Naturwissenschaft zusammen.

Der „Sidereus nuntius" machte Galilei weithin bekannt und rief ein ungewöhnliches Interesse an astronomischen Beobachtungen hervor. Galilei verließ Florenz und trat als Mathematicus Primarius et Philosophus in den Dienst Cosimos II. in Venedig. Hier setzte er seine astronomischen Beobachtungen mit dem Teleskop fort und entdeckte dabei die Venusphasen und die Sonnenflecken. Die Entdeckung der Venusphasen erschien Galilei als entscheidendes, unbestreitbares Argument für die kopernikanische Lehre. Schon frühere theoretische Überlegungen veranlaßten ihn anzunehmen, daß sich aus dem heliozentrischen Weltsystem und der Umdrehung der Venus um die Sonne die Möglichkeit ergibt, von ihr ein Bild zu bekommen, das den Mondphasen entspricht. Galilei sah dann im Teleskop wirklich die Sichel des Planeten Venus. Er schrieb: „Die Venusphasen lassen keinen Zweifel daran, wie die Bewegung der Venus vor sich geht. Wir kommen mit absoluter Notwendigkeit zu einem Schluß, der mit der Auffassung der Pythagoräer und des Kopernikus übereinstimmt. Die Venus bewegt sich um die Sonne, in ähnlicher Weise wie sich auch die anderen Planeten um die Sonne als ihr Zentrum bewegen."[16]

Die Venusphasen sind eigentlich nicht als strenger Beweis für das heliozentrische Weltsystem anzusehen. Aber für die physikalische Seite des Weltbildes ist diese Erscheinung sehr wichtig. Die Venusphasen beweisen, daß dieser Planet mit widergespiegeltem Licht, ähnlich wie der Mond, leuchtet. Der Mond wurde infolge der Entdeckungen Galileis als ein Körper angesehen, der sich nicht prinzipiell von der Erde unterscheidet. Somit beweisen die Venusphasen letzten Endes die physikalische Einheit der Himmelskörper, was ja auch die wichtigste Erkenntnis des heliozentrischen Systems war.

Eine Reihe weltlicher und geistlicher Fürsten interessierte sich für Galileis Entdeckungen. Ungeachtet der wachsenden Reaktion gewann Galilei viele An-

[16] G. Galilei, Prima lettera del Sig. Galileo Galilei al Sig. Marco Velseri circa le macchie Solari, in: Le opere dis Galileo Galilei, Edizione Nazionale, Vol. V, Firenze 1895, p. 99.

hänger. Die scholastischen Gelehrten weigerten sich hingegen entschieden, die durch die astronomischen Beobachtungen widerlegten traditionellen Auffassungen aufzugeben. Am 19. August 1610 schrieb Galilei an Kepler: „Ich denke, mein Kepler, wir lachen über die ausgezeichnete Dummheit des Pöbels. Was sagst Du zu den ersten Philosophen der hiesigen Fakultät, denen ich tausendmal aus freien Stücken meine Arbeiten zu zeigen anbot, und die mit der trägen Hartnäckigkeit einer vollgegessenen Schlange niemals weder Planeten, noch Mond, noch Fernrohr sehen wollten? Wahrlich, wie jene ihre Ohren so verschließen diese ihre Augen vor dem Licht der Wahrheit. Sie sind gar hochfahrend, mir flößen sie aber darum doch keine Bewunderung ein. Diese Gattung Leute glaubt, die Philosophie sei irgendein Buch, etwa die Aeneide oder Odyssee: und man müsse die Wahrheit nicht im Weltraume, nicht in der Natur suchen, sondern (ich gebrauche ihre eigenen Worte) in der Vergleichung der Texte! Wie würdest Du laut aufgelacht haben, wenn Du gehört hättest, was für Dinge der erste Philosoph der Fakultät in Pisa in Gegenwart des Großherzogs mir gegenüber vorbrachte, da er sich anstrengte, bald mit logischen Argumenten, bald mit magischen Beschwörungen die neuen Planeten vom Himmel hinwegzudisputieren und herabzureißen ...“[17]

In dem Maße, wie Galileis Entdeckungen das kopernikanische System zum Gemeingut breiter Gesellschaftskreise werden ließen, wuchs das Unbehagen der Jesuiten und der römischen Kurie. Über der kopernikanischen Lehre zogen sich Wolken zusammen. Die Kirchenfürsten suchten Galilei zu bewegen, von der Verteidigung des heliozentrischen Systems als eines objektiven Weltbildes abzustehen. Sie drängten Galilei zu einer traditionellen formalistischen Behandlung des kopernikanischen Systems. Kardinal Roberto Bellarmino, das Haupt der Inquisition und einer der einflußreichsten geistlichen Würdenträger Roms, schrieb in einem Brief an Pater Paolo Antonio Foscarini, einen Verteidiger der kopernikanischen Lehre, nach seiner Meinung täten Foscarini und Signore Galilei gut daran, nur hypothetisch, nicht apodiktisch über das kopernikanische System zu schreiben. „So hat sich, wie ich immer gedacht habe, auch Kopernikus verhalten. In der Tat: wenn man sagt, die Annahme, daß sich die Erde bewege, die Sonne aber unbeweglich sei, vermöge alle beobachtbaren Erscheinungen besser zu erklären als die Hypothese der Epizyklen und Exzentren, so ist diese Behauptung ausgezeichnet und birgt keine Gefahr in sich. Übrigens reicht dies für mathematische Berechnungen völlig aus. Wenn man aber zu behaupten beginnt, daß die Sonne tatsächlich im Mittelpunkt der Welt ruht, sich um sich selbst dreht, sich aber nicht von Ost nach West bewegt, daß sich die Erde im dritten Himmel befindet und mit großer Geschwindigkeit um die Sonne dreht, so ist das sehr gefährlich. Nicht nur, weil diese Behauptung alle Philosophen und Theologen aufreizt, sondern auch weil sie dem Heiligen Glauben schadet, da sich aus ihr die Falschheit der Heiligen Schrift ergibt.“[18]

[17] Galilei an Kepler, 19. 8. 1610, zit. nach: K. v. Gebler, Galileo Galilei und die Römische Curie, Bd. I, a. a. O., S. 34.

[18] R. Bellarmin an P. A. Foscarini am 12. 4. 1615, in: Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale, Vol. XII, Firenze 1902, p. 171.

Aber Galilei konnte den Ratschlägen Bellarmins nicht folgen. Die physikalische Realität, die objektive Wirklichkeit des heliozentrischen Systems war Grundlage seiner Auffassungen. In seinen 1615 geschriebenen Bemerkungen über die kopernikanische Auffassung („Antwort auf zwei Hauptfragen“) betont Galilei eindringlich, daß das „leere Geschreibsel“ Osianders widerlegt werden müsse. Wenn man das ganze Werk des Kopernikus lese, so gewinne man die Überzeugung, daß die Bewegung der Erde und die Unbeweglichkeit der Sonne für Kopernikus objektive Wahrheiten gewesen seien.

Als die Jesuiten einen energischen Kampf gegen die kopernikanische Lehre zu führen begannen, versuchte Galilei, seine Lehre offen zu verteidigen. Ende des Jahres 1615 fuhr er nach Rom, um sich dort selbst den Angriffen der Inquisition zu stellen. Sie befaßte sich noch nicht unmittelbar mit Galilei, und er hoffte eine Verurteilung des kopernikanischen Systems durch die Kongregation verhindern zu können.

Aber Galilei war nicht über den ganzen Umfang der in Rom herrschenden Reaktion informiert. Seine guten Beziehungen zu einigen Kirchenfürsten ließen ihn nicht den tatsächlichen Terror der Inquisition sehen, deren Opfer er achtzehn Jahre später wurde. Rom wurde von den Jesuiten beherrscht. Der Versuch, eine Verurteilung der kopernikanischen Auffassung zu verhindern, war daher nicht von Erfolg gekrönt. Galileis Gegner hatten zu großen Einfluß, seine Gönner konnten nicht gegen sie aufkommen.

Im März 1616 verwarf die Indexkongregation das kopernikanische System und verbot sein Buch.

Die Entscheidung der Kongregation hätte auf die heimliche Arbeit eines einzelnen Forschers keinen Einfluß ausüben und ihn nicht zu hindern brauchen, die kopernikanischen Auffassungen weiter zu entwickeln. Aber Galilei bedurfte des Verkehrs mit einem großen Kreis von Schülern und Anhängern. Das Verbot der Propaganda der kopernikanischen Lehre war daher für ihn ein schwerer Schlag. Der Dominikaner Lorini bezeichnete in einer Denunziation die Schüler und Freunde Galileis sogar als Freidenker, die von ihrem Lehrer verführt worden seien. Galilei drohte die Verfolgung durch die Inquisition. Seine Verbindung zu seinen Schülern riß ab. Für Galilei begann eine Zeit langer Einsamkeit.

Fünfzehn Jahre träumte Galilei davon, die kopernikanische Lehre erneut zu verteidigen. Im Vertrauen auf eine Unterstützung durch den neuen Papst Urban VIII. gab er in Florenz seinen bekannten „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische“ heraus. Galilei sucht möglichen Einwendungen mit einem Vorworte „An den geneigten Leser“ zu begegnen. Darin sprach er von seinem Vorhaben nur zu dem Zwecke, Argumente für die kopernikanische Lehre geben zu wollen, um zu zeigen, daß das kirchliche Verbot von einer genauen Kenntnis aller Argumente der streitenden Seiten ausgegangen sei.

In den „Discorsi“ unterhalten sich die Gesprächspartner Sagredo, Salviati und Simplicio in Venedig im Palast des Sagredo. Simplicio verteidigt die traditionelle aristotelische Auffassung: Simplicio war ein bekannter Aristoteleskommentator, im Italienischen heißt dieses Wort „der Einfältige“. Mit Sagredo und Salviati,

den beiden anderen Gesprächspartnern, setzt Galilei zwei Freunden ein Denkmal, die schon vor Erscheinen des „Dialogs“ gestorben waren. Galileis Auffassungen werden hauptsächlich von Salviati dargelegt. Sagredo stimmt mit ihm überein, verlangt Erläuterungen, bisweilen ergänzt er die Ausführungen Salviatis. Simplicio streitet mit Sagredo und entwickelt dabei die Argumente der scholastischen Aristoteliker. Den vier Grundgedanken, die die heliozentrische Weltauffassung folgerichtig beweisen und entwickeln, entsprechen vier Gesprächstage. Galileis erster Grundgedanke ist die prinzipielle Einheit der Erde und der Himmelskörper. Er wird in den Dialogen des ersten Tages bewiesen. In den Gesprächen des zweiten Tages geht es um die Drehung der Erde in 24 Stunden. Im Verlaufe des dritten Gesprächstages wird die jährliche Drehung der Erde um die Sonne erklärt. Am vierten Tag beschäftigen sich die Diskussionspartner mit Ebbe und Flut, die nach Galileis Annahme eine Folge der jährlichen und der vierundzwanzigstündigen Erdumdrehung sind.

Die Auffassung von der Objektivität des heliozentrischen Systems, von der Realität der Erdbewegung, zieht sich durch den ganzen „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme“. Zunächst weist Galilei nach, daß die Erde keinesfalls unbeweglich ist; er führt den Unterschied zwischen echter und scheinbarer Bewegung ein und zeigt, daß es im Inertialsystem keinerlei Beweise für die Bewegung gibt, daß Ruhe und Inertialbewegung in ihrem physikalischen Effekt äquivalent sind. Er führt weiter aus, daß den Zentren der Drehbewegung bei jeder Bewegung von Körpern Unbeweglichkeit zukommt. Schließlich beweist Galilei bei der Darlegung der Theorie der Gezeiten, daß die Bewegung der Erde absolut ist.

In den Gesprächen des zweiten Tages läßt Galilei durch Sagredo und Salviati sagen, daß die Bewegung nicht am sich bewegenden Körper selbst festgestellt werden kann, da alle Teile des Körpers an der allgemeinen Bewegung teilhaben. Salviati führt dabei zunächst die Argumente der Aristoteliker an: Ein Stein, von der Spitze eines Turmes fallen gelassen, würde durch die Erdrotation fortgeführt werden und demnach während der Zeit, die der Stein zum Fallen braucht, sich viele Hunderte von Ellen nach Osten entfernt haben. Um diese Strecke müßte also der Stein von dem Fuße des Turmes entfernt niederfallen. Eine Kugel, die aus einem senkrecht zum Zenit gerichteten Kanonenlauf abgeschossen wird, braucht zum Steigen und Fallen soviel Zeit, daß in unserer Breite das Geschütz samt dem Beobachter viele Miglien (Miglio = früher italienische Meile = 1,5 bis 2,5 km — *die Hrsg.*) mit der Erde nach Osten getragen würde und die niederfallende Kugel nimmermehr in der Nähe des Geschützes wieder anlangen könnte, sondern um soviel westlich niederkommen würde, als sich die Erde inzwischen weiterbewegt hat. Schießt man mit einer Feldschlange eine Kugel ins Blaue nach Osten ab, darauf mit gleicher Ladung und unter gleichem Neigungswinkel nach Westen, so müßte die westliche Schußweite viel größer als die östliche sein. Wenn sich nämlich die Kugel nach Westen bewegt, das Geschütz aber von der Erde getragen nach Osten, so müßte die Kugel in einer Entfernung vom Geschütz auf die Erde aufschlagen, die gleich der Summe der beiden Einzelbewegungen ist, nämlich der an und für sich nach Westen gerichteten Bewegung der Kugel und

der nach Osten gerichteten des Geschützes, das von der Erde dorthin getragen wird. Umgekehrt müßte von der Bahn der nach Osten geschossenen Kugel soviel in Abzug kommen, als das Geschütz in derselben Richtung zurückgelegt hat. In Wirklichkeit sind alle diese Erscheinungen nicht zu bemerken, und daher ist die Erde unbeweglich.[19]

Salviati zählt weitere Argumente auf und widerlegt sie schließlich. Er beginnt mit der Analogie zwischen dem Fall eines Steines von einer Turmspitze und einer Bleikugel von der Spitze eines Schiffsmastes. Unerwartet fragt Salviati den Simplicio, ob das Verharren einer vom Mast auf das Schiffsdeck geworfenen Kugel durch die Erfahrung bestätigt ist. Simplicio ist genötigt anzuerkennen, daß er derartige Erfahrungen nicht kennt, wenngleich gerade sie im gegebenen Falle das Problem lösen könnten. Aber Salviati verlangt eine theoretische Lösung. Er erzählt Simplicio von der Trägheit, wobei er sich folgenden Beispiels bedient: eine vollkommen runde Kugel auf einer völlig glatten Ebene wird, wenn die Ebene etwas geneigt ist, beschleunigt nach unten rollen; wenn man ihr aber einen Stoß nach der entgegengesetzten Richtung versetzt, wird sich ihre Bewegung verlangsamen.

Darauf wird Simplicio von Salviati gefragt, was mit dem nämlichen Körper auf einer Fläche geschähe, die weder abschüssig ist noch ansteigt. Simplicio antwortet: „Hier muß ich mich ein wenig auf die Antwort besinnen. Da keine Abschüssigkeit vorhanden ist, so kann kein natürlicher Trieb zur Bewegung vorhanden sein; da auch kein Ansteigen stattfindet, so kann ebensowenig ein Widerstand gegen die Bewegung vorliegen; der Körper muß mithin unterschiedslos weder einen Hang, sich zu bewegen, noch ein Widerstreben gegen die Bewegung besitzen. Er muß also, wie mir scheint, von Natur ausruhen."[20] „Wenn man ihm aber einen Anstoß nach irgendwelcher Richtung gäbe, was würde geschehen?" fragt Salviati weiter.[21] Simplicio entgegnet, da es keine Beschleunigung und Verlangsamung gebe, werde die Kugel ihre Bewegung solange fortsetzen, bis sie auf irgendein Hindernis stößt. Salviati zeigt dann weiter, daß ein Körper, der sich ohne Hindernis auf der Erdoberfläche bewegt, keinen Impuls besitzen wird, um seine Bewegung zu beschleunigen oder zu verlangsamen, denn er vermag seine Bewegung nur zu beschleunigen, wenn er nach unten rollt, sich dem Erdzentrum nähert. Umgekehrt kann er sie nur verlangsamen, wenn er sich vom Erdzentrum abwendet.

Nach der Bestimmung des Inertialbegriffs beweist Salviati, daß ein von der Spitze eines Mastes geworfener Körper seine Bewegung fortsetzen und auf das Deck fallen wird und beim Fall gegenüber dem Schiff nicht zurückbleibt. Ebenso nimmt ein von einem Turm geworfenes Gewicht, nehmen Kanonenkugeln, fliegende Vögel, Wolken und Luft infolge der Trägheit an der Erdbewegung teil. Man kann sich folglich nicht auf sie berufen, wenn man die Erdumdrehung leugnen oder beweisen will.

[19] G. Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, a. a. O., S. 131f.
[20] Ebenda, S. 154.
[21] Ebenda.

Abschließend empfiehlt Salviati dem Simplicio, in einer Schiffskajüte den Flug von Insekten, die Bewegung von Fischen und andere physikalische Prozesse zu untersuchen. Bei gleichmäßiger Schiffsbewegung werden sich alle diese Prozesse überhaupt nicht verändern: „Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgendwelchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; die fallenden Tropfen werden alle in das untergestellte Gefäß fließen. Wenn Ihr Eurem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht kräftiger nach der einen als nach der anderen Richtung zu werfen, vorausgesetzt, daß es sich um gleiche Entfernungen handelt. Wenn Ihr, wie man sagt, mit gleichen Füßen einen Sprung macht, werdet Ihr nach jeder Richtung hin gleichweit gelangen.“[22]

Galilei verlangt, daß seine Opponenten aufmerksam die Äquivalenz aller Richtungen in der horizontalen Ebene registrieren, wenngleich bei ihnen auch kein Zweifel aufkommen konnte, *solange das Schiff sich an einem Ort befindet.* Nun wird das Schiff geradlinig und gleichförmig, ohne Beschleunigung, längs des Kurses, ohne Sprünge und ohne Kiel- oder Bordschaukeln bewegt. Es tritt keine Veränderung im Ablauf der beschriebenen Prozesse ein: „Beim Springen werdet Ihr auf den Dielen die nämlichen Strecken zurücklegen wie vorher, und wiewohl das Schiff aufs schnellste sich bewegt, könnt Ihr keine größeren Sprünge nach dem Hinterteile als nach dem Vorderteile zu machen: und doch gleitet der unter Euch befindliche Boden während der Zeit, wo Ihr Euch in der Luft befindet, in entgegengesetzter Richtung zu Euerem Sprunge vorwärts. Wenn Ihr Eurem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht mit größerer Kraft zu werfen, damit er ankomme, ob nun der Freund sich im Vorderteile und Ihr Euch im Hinterteile befindet oder ob Ihr umgekehrt steht. Die Tropfen werden wie zuvor in das untere Gefäß fallen, kein einziger wird nach dem Hinterteile zu fallen, obgleich das Schiff, während der Tropfen in der Luft ist, viele Spannen zurücklegt. Die Fische im Wasser werden sich nicht mehr anstrengen müssen, um nach dem vorangehenden Teile des Gefäßes zu schwimmen als nach dem hinterher folgenden; sie werden sich vielmehr mit gleicher Leichtigkeit nach dem Futter begeben, auf welchen Punkt des Gefäßrandes man es auch legen mag. Endlich werden auch die Mücken und Schmetterlinge ihren Flug ganz ohne Unterschied nach allen Richtungen fortsetzen. Niemals wird es vorkommen, daß sie gegen die dem Hinterteil zugekehrte Wand gedrängt werden, gewissermaßen müde von der Anstrengung, dem schnellfahrenden Schiffe folgen zu müssen, und doch sind sie während ihres langen Aufenthaltes in der Luft von ihm getrennt. Verbrennt man ein Korn Weihrauch, so wird sich ein wenig Rauch bilden, man wird ihn in die Höhe steigen, wie eine kleine Wolke dort schweben und unterschiedslos sich nicht nach der einen als nach der anderen Seite hin bewegen sehen. Die Ursache dieser Übereinstimmung aller Erscheinungen liegt darin, daß die Bewegung des Schiffes allen darin enthaltenen Dingen, auch der Luft, gemeinsam zukommt.“[23]

[22] Ebenda, S. 197.
[23] Ebenda, S. 198.

Wir machen auf den spezifischen emotionalen Unterton der Ausführungen Salviatis aufmerksam. In ihnen kommt eine ungezwungene und lichte Freude zum Ausdruck. Letzten Endes wird sie durch das Schaffen Galileis erklärt, die schöpferische und freudige Verteidigung des Verstandes, der selbst in unanfechtbarer Weise die Geheimnisse des Seins enthüllt. Sie werden in mathematischen Wechselbeziehungen aufgedeckt. Bei Galilei ist das qualitative Bild der Erscheinungen in der Schiffskajüte angesiedelt, aber es enthält den Keim eines Weltbildes, das die Wirklichkeit mathematisch erklärt. In diese Worte kleidet Galilei sein Anliegen. Neben den zitierten Ausführungen Salviatis steht die Marginalie: „Versuch, der allein die Nichtigkeit aller gegen die Erdbewegung angeführten Versuche dartut."[24]

Galileis Gedankenexperiment ist die Grundlage für eine dreihundertjährige Folge von Überlegungen, die das mechanische Wesen der Naturerscheinungen und die Möglichkeit nachweisen, diese Erscheinungen mit einem anschaulichen kinematischen Schema von sich im gleichen Raum bewegenden Körpern zu erklären. Diese Möglichkeit (und damit die Möglichkeit einer erschöpfenden mathematischen Naturanalyse) ist auch Grundlage der Klarheit, die das von Galilei gezeichnete Bild durchdringt. Es ist qualitativ und farbenreich. Hier wird die Möglichkeit einer mathematischen Naturerkenntnis deutlich, nicht aber die Erkenntnis selbst. Daher beschränken sich die konkreten und eindeutigen Schlüsse auf die Erdbewegung. In der Folgezeit wurde der Inertialbegriff zum Ausgangspunkt für die Vorstellung eines unendlichen Weltalls. Wenn ein sich selbst überlassener Körper seine Geschwindigkeit unverändert beibehält, so gelangen wir aus dem Bereich der endlichen und anschaulich vorstellbaren kinematischen Schemata in das unendliche Weltall, wo die mathematischen Relationen in ihrer abstraktlogischen Form ohne irgendwelche sinnlichen Bilder erscheinen. Von dieser Art ist die Welt Newtons und Lagranges. Galilei steht auf der Schwelle zu dieser Welt.

Der Inertialbegriff führt eindeutig zu einer unendlichen Trajektorie eines sich selbst überlassenen Körpers, wenn man unter der Inertialbewegung geradlinige Bewegung versteht, d. h. Erhaltung der absoluten Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung. Anderenfalls kann sie in sich zurücklaufen, und die Trägheitsbewegung führt die Körper nicht über die Grenzen eines endlichen Bereiches hinaus.

Bei Galilei ist nun die Inertialbewegung derart, daß sie nicht in einer geraden, sondern in einer geschlossenen kreisförmigen Kurve verläuft. Nach Galilei ist die *reale* horizontale Ebene die Kugeloberfläche. Weshalb erhalten nun die sich auf der Kugeloberfläche bewegenden Körper ihre Geschwindigkeit? Welche Argumente benutzt Galilei, um die kreisförmige Bahn der sich selbst überlassenen Körper zu erklären?

Es muß vor allem festgestellt werden, daß es in Galileis frühen Arbeiten zur Mechanik keinen abstrakten Begriff eines kräftefreien Körpers gibt. Galilei neigte zu Gedankenexperimenten, in denen das konkrete kinematische Modell die Einwirkung anderer Körper auf den gegebenen ausschaltet. Der schwere Körper rollt

[24] Ebenda, S. 197.

auf der glatten Oberfläche der Sphäre, deren Mittelpunkt mit dem Erdzentrum zusammenfällt. Er entfernt sich nicht von der Oberfläche der Kugel, da eine solche Bewegung einem schweren Körper nicht eigen ist. Der Körper nähert sich nicht dem Erdzentrum, da er hieran durch die Kugeloberfläche gehindert wird. Die Kugeloberfläche selbst verhält sich indifferent zur Bewegung der Körper auf ihr.[25]

Der konkrete Charakter eines solchen Modells verbirgt den Zusammenhang einer kreisförmigen Bewegung mit den eigentlich geometrischen Eigenschaften dieser Bahn. Der Körper rollt deshalb auf der Kreisbahn, weil seine Bewegung zu ihrem Mittelpunkt durch den Widerstand der harten Kugeloberfläche verhindert wird. Dies ist die für Galilei charakteristische konkrete Form der sehr abstrakten Vorstellung.

Dem Wesen nach bedeutet die Neutralisation der dem Körper wesentlichen Bewegung zum Zentrum hin auch, daß der Körper sich selbst überlassen ist, denn die Einwirkungen der Kugeloberfläche werden wiederum durch das Streben des Körpers zum Zentrum ausgeschaltet. Ein derartiges Schema geht leicht in eine abstrakte Form über, in eine Auffassung vom sich selbst überlassenen Körper. Dabei erhebt sich die Frage nach den geometrischen Eigenschaften der Umlaufbahn.

Im „Dialog" sieht Galilei von den festen Sphären ab und beseitigt sowohl die Einwirkung durch die Kugeloberfläche als auch die Anziehung der Planeten durch die Sonne, d. h. also beide Kräfte, die sich im angeführten Schema neutralisierten.

Der Grundbegriff der Himmelsmechanik ist im „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme" die gleichförmige Kreisbewegung.[26] Im Gegensatz zu Kepler entwirft Galilei ein sehr einfaches Bild des Sonnensystems. Im Zentrum der kreisförmigen Planetenbahnen befindet sich die Sonne. Jeder Planet bewegt sich gleichförmig auf seiner Bahn. Der ganzen Theorie der Ungleichförmigkeit der Planetenbewegung bis hin zu den Keplerschen Gesetzen wird von Galilei keine Aufmerksamkeit geschenkt. Kepler hatte schon 1609 über die elliptische Bahn des Mars und über die unterschiedliche Geschwindigkeit der Planeten in den verschiedenen Ellipsenpunkten geschrieben. Galilei interessierte sich jedoch nicht für dieses Problem.

Für jeden Mechaniker in der auf Newton folgenden Zeit ist es klar, daß die Bewegung, die die Erde den auf ihr befindlichen Gegenständen bei ihrer täglichen Umdrehung mitteilt, durch die Trägheit längs der Tangente zur Erdoberfläche gerichtet ist. Aber für Galilei fällt die Richtung der Inertialbewegung mit der Bewegungsrichtung der auf der Erde befindlichen Gegenstände zusammen. Galilei sieht die Inertialbewegung als eine kreisförmige Bewegung an, weil er die Schwerkraft nicht in Rechnung stellt.

Die wirkliche Erklärung der Bewegung der Himmelskörper mittels der Mechanik irdischer Körper konnte erst erfolgen, nachdem Descartes den Gedanken der

[25] Vgl. G. Galilei, De motu, in: Le opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale, Vol. I, Firenze 1890, p. 300.

[26] Vgl. A. Koyrè, Etudes galiléennes, I, Paris 1939, p. 72; III, Paris 1939, p. 48, Н. И. Идельсон, Галилей в истории астрономии, in Sammelband: Галилео Галилей, Moskau 1943, S. 127.

geradlinigen Inertialbewegung formuliert hatte und als Newton, der das Trägheitsprinzip durch die Gravitationsgesetze ergänzte, eine Mechanik aufgebaut hatte, die die Keplerschen Gesetze mit den mechanischen Prinzipien Galileis vereinigte.

Die Idee der kreisförmigen Inertialbewegung läßt den Zusammenhang der Mechanik Galileis mit der Mechanik und Kosmologie des Aristoteles erkennen, aber auch den grundlegenden Unterschied der Gedanken Galileis gegenüber der gesamten vorhergegangenen Wissenschaft.

Galileis Weltanschauung fußt auf einem Gedanken, der für die Wissenschaft entscheidend war und blieb: Die Gesamtheit der Prozesse im Weltall bildet ein harmonisches, geordnetes Ganzes, alles in der Welt wird von der Ratio durchdrungen. Dieser Gedanke ist so alt wie die Wissenschaft selbst und unterscheidet sie von vorwissenschaftlichen Vorstellungen. Die Entwicklung der Wissenschaft besteht in der konsequenten Erklärung des Kausalzusammenhangs, der das Weltgebäude verbindet und in ein geordnetes Ganzes verwandelt.

Zu Beginn des ersten Gesprächstages berichtet Salviati von den Auffassungen des Aristoteles und schließt sich dem Gedanken von einer in der Welt herrschenden Ordnung an. Die Gedanken, die Galilei Salviati in den Mund legt, erwecken den Eindruck, als stünden die Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts, wenn auch nur dem Anschein nach, dem 4. Jahrhundert v. u. Z. näher als dem Ende ihres eigenen Jahrhunderts. Am Ende und selbst in der Mitte des 17. Jahrhunderts nahm man an, daß die Kausalharmonie des Seins in der Wechselwirkung der Körper zum Ausdruck gebracht wird, die die den isolierten Körpern eigenen geradlinigen Bewegungen krümmen.

Im 4. Jahrhundert v. u. Z. stellte sich Aristoteles die Weltharmonie als *statische Konfiguration natürlicher Örter vor*, in denen sich die Körper befinden, wenn das Weltall in einen geordneten Zustand übergeht. Die Körper bewegen sich geradlinig zu ihren natürlichen Örtern (schwere Körper zum Erdzentrum, d. h. zum Zentrum des Weltalls). Dies ist das Schicksal der unvollkommenen Körper der sublunearen Welt. Die vollkommenen Körper bewegen sich nicht aus etwas in etwas, sondern wiederholen unveränderliche Kreise auf konzentrischen Himmelssphären; ihnen sind die Kreisbewegungen wesenseigen.

Galilei gab gleich Kopernikus den Begriff der vollkommenen Kreisbewegungen nicht auf; er reihte die Erde unter die Körper ein, die solche Bewegungen vollziehen. Eine solche Modifikation des Begriffs der vollkommenen Bewegung muß letzten Endes zu einer radikalen Überprüfung der aristotelischen Raumauffassung führen — zum Newtonschen Begriff der gleichförmigen unendlichen „ebenen" Bewegung. Aber das geschah erst nach Galilei.

Im „Dialog" ergibt sich die Kreisbewegung aus der Existenz der „vollkommenen Ordnung", aus der Harmonie des Weltgebäudes. „In der wohlgeordneten Welt kann es unmöglich eine geradlinige Bewegung geben", lautet die Marginalie zu Salviatis Worten, in denen er sich mit der Auffassung des Aristoteles solidarisiert.[27] Es ist zu betonen, daß eines der Argumente, die die geradlinige Bewegung

[27] G. Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, a. a. O., S. 20.

aus den vollkommenen ausschließen, die Unendlichkeit der geraden Linie ist: Die gerade Trajektorie führt zu keinem endgültigen Bewegungsresultat, sie kann beliebig weit fortgesetzt werden und wird nicht durch ein endliches statisches Schema unbewegter natürlicher Örter bestimmt.

Galilei deutet sogar ein kosmogonisches Schema an: der ursprünglich ungeordnete Zustand des Weltalls barg auch die geradlinige Bewegung in sich. Als das Weltall dann zu einer Harmonie gelangte, blieben nur die Kreisbewegungen erhalten.[28]

Die Galilei und Aristoteles verbindende Idee gehört zu den „Fragen", die dem kanonisierten Inhalt der peripatetischen Mechanik und Kosmologie widersprachen. Die Bewegung nach oben und nach unten sowie die „erzwungenen" Bewegungen der aristotelischen Physik waren kanonisierte Lehrauffassungen der scholastischen Aristoteliker. Im Gegensatz dazu blieb die Sphärenbewegung, d. h. die Verschiebung in zweidimensionalen Bereichen, die das Zentrum des Weltgebäudes konzentrisch umgeben, Gegenstand der Aporien, der Widersprüche, des Zweifelhaften und insgesamt ein Problemkreis, der an die Zukunft adressiert war. Hier verbargen sich die Begriffe der Homogenität und Kontinuität des Raumes und der Relativität der Bewegung.[29]

Gerade diesen zukunftsträchtigen Ideen des Aristoteles wandte Galilei seine Aufmerksamkeit zu. Nach den genannten Bemerkungen über die Ordnung der Welt und die Kreisbewegungen berührt der „Dialog" das Problem der Geschwindigkeit und der Beschleunigung. Dann kehrt das Gespräch zu Fragen der Kreis- und der geradlinigen Bewegungen zurück.

Salviati führt aus: „Wir werden also zu unserem ursprünglichen Gegenstande zurückkehren und da wieder anknüpfen, wo wir abgeschweift sind. Wenn ich mich recht erinnere, waren wir dabei, festzustellen, daß die geradlinige Bewegung unter Voraussetzung einer wohlgeordneten Welt nutzlos sein muß; wir haben weiter hervorgehoben, daß die Sache bei den kreisförmigen Bewegungen anders liegt: denn die Bewegung des Körpers um sich selbst hält ihn ja stets an derselben Stelle fest, und die Bewegung auf dem Umfange eines Kreises um dessen unverrückt festes Zentrum hat keine Aufhebung der Ordnung weder für ihn selbst noch für benachbarte Körper im Gefolge. Eine solche Bewegung ist nämlich endlich und begrenzt, und nicht bloß das, es gibt auch keinen Punkt auf dem Umfang des Kreises, der nicht zugleich Anfangs- und Endpunkt der Kreisbewegung wäre ..."[30]

Aus der Tatsache, daß *jeder* Punkt auf der Kreisbahn sowohl Anfangs- als auch Endpunkt der Bewegung ist, folgert Galilei die Gleichförmigkeit der Kreisbewegung. Die Beschleunigung ist Resultat der Neigung zu einem bestimmten Ort des Raumes. Auf der Kreisbahn gibt es solche Örter nicht; und die Kreisbewegung kann daher nicht beschleunigt sein.

[28] Ebenda, S. 20f.
[29] Vgl. Б. Г. Кузнецов, Бесконечность и относительность, in: Эйнштейн и развитие физико-математической мысли, Москва 1962, S. 137–154.
[30] Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, a. a. O., S. 33.

„Da es sich hier um die Bewegung handelt, die den Körper beständig vom Ziele entfernt und ihn beständig zu ihm hinführt, so kann zunächst nur sie gleichförmig sein; denn die Beschleunigung entsteht, wenn sich der Körper nach einem erstrebten Ziele hin bewegt und die Verzögerung tritt ein durch die Abneigung, sich von jenem Ziele zu trennen und zu entfernen. Da er aber bei der Kreisbewegung sich stets von dem natürlichen Ziele trennt und wieder zu ihm hinbewegt, so sind bei ihm Abneigung und Neigung gleich; aus dieser Gleichheit geht eine weder verzögerte noch beschleunigte Geschwindigkeit hervor, d. h. eine gleichförmige Bewegung."[31]

Die aus der scholastischen Tradition übernommenen Termini „Neigung" und „Abneigung" zeugen zweifellos davon, daß Galilei der aristotelischen Tradition nahesteht. Aber *welcher* Tradition? Im gegebenen Falle zielt Galileis Denken auf jene lebendigen, nichtkanonisierten (und gar nicht kanonisierbaren) Fragen und auf jenes Suchen, das die antike Wissenschaft als antidogmatische Tradition den folgenden Jahrhunderten überlieferte. Auf der Kreisbahn neutralisieren „Neigung" und „Abneigung" einander. Welcher Sinn wohnt diesem seiner Form nach peripatetischen Gedanken inne? Wenn die „Neigungen" und „Abneigungen" sich neutralisieren und aufheben, so erhalten wir einen Raum, in dem es keine ausgewählten Punkte gibt, die durch ihre Konfiguration die Bewegung der Körper bestimmen. Solche *gleichwertige Räume* waren schon die konzentrischen Sphärenoberflächen in der Kosmologie des Aristoteles. Galilei verbindet aber „Neigungen" und „Abneigungen" mit den *Beschleunigungen*; eine Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit erfordert keinen Impuls, was sogleich das Weltbild verändert.

Sobald die Bewegung ein Zustand ist und dem Körper zugeschrieben wird, versteht es sich von selbst, daß die Ordnung der Welt, ihre Harmonie, ihre Ratio nicht mehr statisch bleibt und zu einem *kinematischen* Schema wird. Bei Aristoteles stand die einen Impuls erfordernde Bewegung dem System der natürlichen Örter und den „vollkommenen" Bewegungen gegenüber, von denen die ersteren ein bestimmtes Element der Weltharmonie waren. Bei Galilei wird ein Schema von gleichmäßigen *Bewegungen* bestimmt, ein System von Kreisbewegungen, die er für natürliche hält. Das statische Schema tritt soweit in den Hintergrund, daß seine Existenz im Weltbild fast unbemerkbar und für Galilei sogar uninteressant wird. Folglich liegt hier der Schlüssel zum Verständnis von Stil und Inhalt der kosmologischen Exkurse Galileis.

Gegenüber Aristoteles erhält bei Galilei der Gedanke der Weltharmonie eine prinzipielle Form. Das Bleibende, Unveränderliche, das Subjekt der Veränderungen (das mit sich selbst identische Subjekt, ohne das der Begriff der Veränderung seinen Sinn verliert) ist nicht mehr die natürliche statische Konfiguration, sondern das natürliche kinematische Schema der gleichförmigen Bewegungen. Dementsprechend werden die Veränderungen von nun ab in Veränderungen der Geschwindigkeit zum Ausdruck gebracht.

Welche gleichförmigen, nach ihrer absoluten Geschwindigkeit unveränderlichen Bewegungen sind Elemente der Weltharmonie: die gekrümmten oder die gerad-

[31] Ebenda, S. 34.

linigen? Wenn die ersteren gelten (wenn alle sich selbst überlassenen Körper sich auf geschlossenen Kreisbahnen bewegen), so bewirkt das Schema der Bewegungen der sich selbst überlassenen Körper *selbst* die Kontinuität der kosmischen Prozesse. Wenn sich die Körper geradlinig bewegen, so birgt das geordnete Weltsystem bestimmte Wechselwirkungen der Körper, die ihre Wege krümmen. Dies sind Descartes' Wirbel oder die Newtonschen zum Zentrum strebenden Kräfte der universellen Gravitation.

Wir greifen unseren weiteren Ausführungen vor, indem wir schon hier feststellen, daß der Begriff einer in der Natur herrschenden „Ordnung" im 19. Jahrhundert seine rationale Form in den *Erhaltungssätzen* verschiedener physikalischer Veränderlicher erhielt. Die Erhaltung des Impulses bringt gleichsam die „Nichteinmischung" des Raumes in den Verlauf der physikalischen Prozesse zum Ausdruck, die Möglichkeit für das System, ohne Veränderung des Charakters der dem System immanenten Prozesse von einem Raumpunkt zu einem anderen überzugehen, die Äquivalenz der Raumpunkte im Sinne der Identität einiger Relationen, die den Prozeßablauf im System beschreiben. Mit anderen Worten: Es wird die *Homogenität des Raumes* ausgedrückt. Vom Standpunkt der allgemeinen Relativitätstheorie bilden die äquivalenten Punkte (für die der Übergang eines Systems von einem zum anderen Punkt keine Veränderungen des physikalischen Prozeßverlaufes hervorruft) nicht notwendig gerade, sondern im allgemeinen gekrümmte Linien. Der Raum der allgemeinen Relativitätstheorie ist homogen und gekrümmt, wie wir noch zeigen werden.

In den angeführten Worten des „Dialogs" wird die Kreisbahn dadurch charakterisiert, daß es auf ihr keine nichtäquivalenten Punkte gibt. Die Bewegung beginnt in keinem Punkte und hört in keinem auf. Kein Punkt wird gegenüber den anderen dadurch ausgezeichnet, daß der Körper in ihm zu etwas anderem gelangt, daß er etwa beginnt, einen anderen Punkt oder seinen natürlichen Ort anzustreben. Es geht somit um einen bestimmten Raum, der aus äquivalenten Punkten gebildet ist, d. h. um den *homogenen* Raum.

Natürlich ist eine derartige Interpretation der kreisförmigen, gekrümmten kosmischen Trägheit Galileis nur in der Retrospektive möglich. Bis zum Jahre 1916, bis zur Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie, hätte niemand den spezifischen Oberflächen, die die Sonne umgeben und auf denen sich die Planeten nach Galilei ohne irgendwelche Wirkung einer Schwerkraft und überhaupt von Wechselwirkungskräften der kosmischen Körper bewegen, das Attribut der Homogenität ansehen können. Kein Vergleich von physikalischen Konzeptionen der Vergangenheit mit solchen unserer Zeit entgeht dem Vorwurf, zu modernisieren. In unserem Falle wäre ein derartiger Vorwurf aber offensichtlich unbegründet und ein Vergleich darüber hinaus aus folgenden Gründen sinnvoll.

Man kann natürlich einen positiven Gedanken der Vergangenheit, entgegen dem vom Vergleich unabhängigen wirklichen Sinn der betreffenden Auffassung, willkürlich mit späteren Konzeptionen identifizieren. Kann man aber ein analoges Verfahren bei *Problemen und Aporien* anwenden, die zu ihrer Zeit keine Beantwortung oder Lösung erfuhren? Diese Fragen und Aporien haben doch keinen von der Gegenüberstellung unabhängigen absoluten Sinn, ihr Sinn ist unklar, solange

nicht eine Antwort gegeben ist, solange nicht die Aporie zu lösen versucht wurde. Der Sinn eines Rätsels wird sichtbar, wenn es zumindest teilweise gelöst ist. Eine Analogie erklärt ein solches Wechselverhältnis. Die Entfernungen zwischen den Punkten werden beim Übergang von einem Bezugssystem zu einem anderen nicht verändert. Die Entfernungen zwischen den Punkten sind invariant bezüglich des Bezugssystems. Andererseits haben die Koordinaten der Punkte ohne Hinweis auf das Bezugssystem keinen konkreten Sinn. Der Inhalt einer positiven Konzeption („was wurde gefunden") kann in invarianter Form zum Ausdruck gebracht werden, unabhängig von einem bestimmten historischen „Bezugssystem", d. h. unabhängig von dieser oder jener Ausgangsposition der historischen Retrospektive. Der Sinn einer Aporie oder einer Frage („was wurde nicht gefunden") kann nicht invariant formuliert werden.

Wenn wir die Galileische gekrümmte kosmische Trägheit unter dem Gesichtspunkt der allgemeinen Relativitätstheorie betrachten, so suchen wir damit im „Dialog" keineswegs eine „Antizipation" der Einsteinschen Ideen. Wir suchen auch keine positiven historischen Vorbilder dieser Ideen. Galilei leugnete die Schwerkraft und schrieb die gekrümmte Bahn einem sich selbst überlassenen Körper zu. Er kam nicht zum Gedanken der Identität von Gravitation und gekrümmtem Raum und konnte es auch gar nicht. Es geht hier um etwas anderes. Nachdem Einstein die physikalische Realität des homogenen gekrümmten Raumes festgestellt hatte, veränderte sich die früher durch Galilei (wenn auch unklar) bestimmte Ausgangsposition der retrospektiven Einschätzung der gekrümmten Trägheit. Man schätzte sie damals unter Zugrundelegung des ersten Newtonschen Gesetzes als dem Prinzip der Inertialbewegung und dem Gravitationsgesetz widersprechend ein. Wir neigen heute zu einer anderen Auffassung und sehen im Gedanken der Kreisbewegung der Erde und der anderen Planeten eine keimhafte und undifferenzierte Form aller späteren Modifikationen des Trägheitsprinzips und der Idee der Homogenität des Raumes, die *auch* die Konzeption eines gekrümmten homogenen Raumes enthält.

Für die Charakterisierung der Wissenschaft des 17. Jahrhunderts ist es sehr wesentlich, sich das Galileische System als lebendig, nicht stillstehend vorzustellen, das nicht nur Vorstufe zur klassischen Mechanik Newtons ist, sondern auch für die folgenden Verallgemeinerungen wertvolle Gedanken enthält. Für das 17. Jahrhundert sind biegsame, ineinander übergehende Tendenzen wissenschaftlichen Denkens kennzeichnend, die sich nicht in feste Formen pressen lassen. Hiervon ausgehend läßt sich die Auffassung Galileis von der Sonne als dem Zentrum der Welt verstehen.

Im „Dialog" und in anderen Schriften Galileis wird mehrfach ein endliches Weltall mit der Sonne in seinem Zentrum behauptet. Gleich nach den oben angeführten Überlegungen zur kosmischen Harmonie der gleichförmigen Kreisbewegungen sagt Salviati, die Kritik des Geozentrismus fortsetzend: „... wenn man vielmehr dem Weltall überhaupt einen Mittelpunkt zuschreiben kann, so ließe sich eher die Sonne als solche betrachten, wie Ihr im Verfolg unserer Erörterungen ersehen werdet."[32]

[32] Ebenda, S. 35f.

Dem Begriff des Zentrums des Weltalls entspricht der Begriff einer Weltallsphäre. Galilei sah das, aber der Begriff des Zentrums — die Sonne — interessierte ihn viel mehr als die augenscheinlich unvorstellbaren, wenn auch logisch mit dem Begriff des Zentrums zusammenhängenden Grenzen des Weltalls. Im Gespräch des dritten Tages veranlaßt Salviati den Simplicio, eine Skizze des Weltalls zu entwerfen, die den unbestreitbaren astronomischen Tatsachen entspricht. Sie ist rein kopernikanisch. Salviati fragt: „Was sollen wir nun mit den Fixsternen anfangen, Signore Simplicio?" Simplicio weist ihnen eine Sphäre an, die um ein bestimmtes Zentrum (die Sonne) beschrieben und innerhalb zweier Kugelflächen enthalten ist. „... in diese Sphäre möchte ich die unzählbare Menge der Sterne versetzen, aber in verschiedene Höhen. Man könnte dieselbe die Sphäre des Universums nennen, insofern sie die von uns vorhin gezeichneten Planetensphären in sich enthält."[33]

Bei Galilei kann man der Vorstellung vom endlichen Weltall als einer Sterneninsel im unendlichen Raum begegnen. Salviati pariert die Argumente gegen Kopernikus, die Berufung auf die großen Ausmaße der Sternensphäre, die sich aus dem heliozentrischen System ergeben, und stellt dabei fest: „Wäre nun die ganze Fixsternsphäre ein einziger leuchtender Körper, wer sähe nicht die Möglichkeit ein, im unendlichen Raum einen so entlegenen Punkt zu bestimmen, daß von ihm aus besagte leuchtende Sphäre so klein erschiene und noch kleiner, als uns jetzt von der Erde aus ein Fixstern erscheint?"[34]

Wenn Galilei vom endlichen Weltall spricht, so immer in sehr vager Form. Ebenso sind seine Äußerungen über das unendliche Weltall ohne Zentrum gehalten. Manchmal finden sich Äußerungen über die Unlösbarkeit des Problems der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Weltgebäudes. Im Gespräch des dritten Tages fragt Salviati den Simplicio, wie der Mittelpunkt beschaffen sei und wo er sich befinde, um den sich die Erde bewege. Simplicio antwortet: „Ich verstehe unter Mittelpunkt den Mittelpunkt des Universums, der Welt, der Fixsternsphäre, des Himmels."[35]

Salviati zweifelt an der Existenz eines solchen Zentrums. Er relativiert seine Frage: was befindet sich im Zentrum des Weltalls, wenn ein solches existiert?

„Ich könnte mit gutem Grunde hier die Streitfrage aufwerfen, ob ein solcher Mittelpunkt in der Natur überhaupt vorhanden ist; denn weder Ihr noch sonst jemand hat je bewiesen, daß die Welt endlich und von bestimmter Gestalt sei und nicht etwa unendlich und unbegrenzt. Ich gestehe Euch jedoch vorläufig zu, daß sie endlich und von einer Kugelfläche umgrenzt sei, und daß sie mithin einen Mittelpunkt besitze; wir werden dann zu prüfen haben, ob es wahrscheinlich sei, daß die Erde und nicht vielmehr ein anderer Körper sich in diesem Mittelpunkt befinde."[36]

Nach Galileis Auffassung hätte sich Aristoteles vom Gedanken eines endlichen Weltalls mit einem Zentrum nicht trennen können, und wenn die Beobachtungen ihn genötigt hätten, vom geozentrischen System abzugehen, so hätte er die Sonne

[33] Ebenda, S. 340.
[34] Ebenda, S. 386f.
[35] Ebenda, S. 333.
[36] Ebenda, S. 334.

ins Zentrum der Welt gesetzt. Der Beweis hat die hier angeführten Ausgangspunkte der aristotelischen Kosmologie zur Grundlage. Dementsprechend muß sich die Wahl des Zentralkörpers aus kinematischen Überlegungen ergeben. Solche Gedanken zwingen dazu, die Sonne in den Mittelpunkt der Planetenbahnen zu stellen. Dieses Zentrum muß, wenn man eine endliche sphärische Welt annimmt, als ihr Zentrum angesehen werden.

„Nehmen wir also unsere Betrachtungen wieder von vorne auf und setzen dem Aristoteles zuliebe voraus, daß die Welt, von deren Größe wir über die Fixsterne hinaus keine sinnliche Kenntnis besitzen, Kugelgestalt habe, sich im Kreise bewege und daher notwendig um ihrer Gestalt und ihrer Bewegung willen einen Mittelpunkt besitze. Da wir überdies mit Sicherheit wissen, daß innerhalb der Sternensphäre viele andere Sphären, eine innerhalb der anderen, nebst den zugehörigen gleichfalls kreisförmig bewegten Sternen enthalten sind, so fragt es sich, welche Meinung vernünftiger sei: soll man annehmen, daß diese innere Sphären sich gleichfalls um den Weltmittelpunkt drehen, oder um einen anderen weit davon entfernten Mittelpunkt?“[37]

Simplicio antwortet, er halte die Existenz eines gemeinsamen Zentrums für vernünftiger. Darauf entgegnet Salviati: „Wenn nun wirklich der Weltmittelpunkt identisch mit dem Mittelpunkt sein soll, um welchen die Weltkörper, nämlich die Planeten, kreisen, so ist es ausgemacht, daß nicht die Erde, sondern vielmehr die Sonne im Mittelpunkt der Welt steht.“[38]

Der Übergang vom Sonnensystem zum Kosmos wird von Galilei nicht nur im „Dialog“ mit Vorbehalten über die Relativität des Begriffs des Zentrums und der Grenzen des Weltalls verbunden. Im Schreiben an Francesco Ingoli sagt Galilei: „Und ist Ihnen unbekannt, daß es bislang noch nicht entschieden ist und ich denke, daß es die menschliche Wissenschaft niemals entscheiden wird, ob das Weltall endlich oder unendlich ist?“[39]

Es ist charakteristisch, daß Galilei jedesmal den Ton ändert, wenn er vom Sonnensystem zum Kosmos übergeht. Der gewöhnlich energische Stil kommt nicht mehr vor, die freigebige Anwendung von Epitheta und Bildern hört auf, die Darlegung läßt saft- und kraftlose Indifferenz durchschimmern. Vielleicht kann das mit der besonderen Gefährlichkeit der Idee der Unendlichkeit der Welt erklärt werden, für die ja Giordano Bruno den Feuertod erlitten hatte. Die ebenso gefährliche Idee der physikalischen Realität und der Eindeutigkeit des kopernikanischen Systems wird aber von Galilei sehr energisch vertreten. Auf jeden Fall erklärt das Odium um Brunos Namen nicht, weshalb sich Galilei zu diesem nicht weniger gefährlichen Thema nicht eindeutig äußerte. Möglicherweise liegt der Hauptgrund im Inhalt der physikalischen und astronomischen Grundauffassungen Galileis und in seinem Schaffensstil.

Wir haben schon ausgeführt, daß der unendliche Raum ein Bereich ist, in dem man sich nicht mit qualitativen Modellvoraussetzungen der mathematischen

[37] Ebenda, S. 335.
[38] Ebenda.
[39] Vgl. E. Wohlwill, Galilei und sein Kampf für die copernikanische Lehre, Bd. II, Hamburg—Leipzig 1926, S. 84.

Naturforschung bewegen kann, sondern nur mit mathematischen Begriffen und Methoden. Galilei gehört zu sehr der Renaissanceperiode an, um von anschaulichen kinematischen Vorstellungen abzugehen, die zwar nicht mehr statisch wie bei Aristoteles, aber auch noch keine analytischen Konstruktionen sind. Er bleibt im Bereich des Gedankenexperiments und der anschaulichen Analogien. Der Hauptinhalt seiner Ideen fand hier adäquaten Ausdruck und ergriff vom anschaulichen und gegenständlichen Denken vieler Menschen Besitz. Die extensive Unendlichkeit des Seins änderte nichts an der Behandlung der für Galilei, seine Anhänger und überhaupt für die Wissenschaft in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts zentralen Probleme. Die Planeten bewegen sich um die Sonne, die Fixsterne befinden sich in Entfernungen, die alles Vorstellbare übertreffen. Warum sollte darüber hinaus das Weltall als unendlich aufgefaßt werden? Was Galilei mit der Renaissancekultur verbindet, widerspricht seinem kühnen Eindringen in jenen Bereich, in dem nicht nur die Erde, sondern genauso alles, was Galilei entdeckte, als er im Jahre 1610 als erster das Teleskop auf den Sternenhimmel richtete, unendlich klein erscheint.

Galilei unterscheidet sich von Aristoteles vor allem durch diese *differentiale Weltanschauung*, die Vorstellung von einer unendlichen Zahl unendlich kleiner Raum- und Zeitelemente, in denen sich die Gesetzmäßigkeiten des Seins exakt durchsetzen. Die Vorstellung von einer momentanen Beschleunigung wurde zwar erst nach Galilei exakt formuliert. Aber es finden sich bei ihm schon die dafür erforderlichen Begriffe. Wir werden ihnen begegnen, wenn wir die „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen" behandeln. Die aristotelische Auffassung, wonach die Bewegung durch Grenzbedingungen bestimmt wird („aus etwas in etwas"), wurde im „Dialog" und später in den „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen" durch eine Konzeption ersetzt, in der die Bewegung durch die Wechselbeziehung eines unendlich kleinen Raum- und Zeitzuwachses bestimmt wird. Diese lokalen Wechselbeziehungen standen mit dem Begriff eines unendlichen Raumes und einer unendlichen Zeit im Zusammenhang, aber *diese Unendlichkeit wurde intensiv gefaßt*. Riemann sagte: „Die Fragen über das Unmeßbargroße sind für die Naturerklärung müßige Fragen. Anders verhält es sich aber mit den Fragen über das Unmeßbarkleine. Auf der Genauigkeit, mit welcher wir die Erscheinungen ins Unendlichkleine verfolgen, beruht wesentlich die Erkenntnis ihres Kausalzusammenhangs. Die Fortschritte der letzten Jahrhunderte in der Erkenntnis der mechanischen Natur sind fast allein bedingt durch die Genauigkeit der Konstruktion, welche durch die Erfindung der Analysis des Unendlichen und die von Archimed, Galilei und Newton aufgefundenen einfachen Grundbegriffe, deren sich die heutige Physik bedient, möglich geworden ist."[40]

Galilei verbindet die antiken Urbilder einer differentialen Weltanschauung mit ihrer verhältnismäßig vervollkommneten Form. Darin besteht sein historisches Hauptverdienst. Nach Galilei wurde für über drei Jahrhunderte die Vorstellung

[40] B. Riemann, Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen, in: Bernhard Riemanns Gesammelte mathematische Werke und wissenschaftlicher Nachlaß, Leipzig 1876, S. 267.

von der Bewegung eines mit sich selbst identischen Objektes von Punkt zu Punkt und von Augenblick zu Augenblick, die Vorstellung einer Unendlichkeit von Punkten und Augenblicken zur Grundlage der Physik. Im unendlich kleinen Bereich stoßen wir auf einfache Wechselbeziehungen zwischen Raum und Zeit, die zu einer sehr genauen Beschreibung der Kausalzusammenhänge führen.

Bis zur Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie entsprach das Problem der extensiven Unendlichkeit des Weltalls der Riemannschen Bemerkung. Je weiter sich daher die Wissenschaft von der Welt endlicher Bereiche entfernte, die sie in eine unendliche Zahl unendlich kleiner Teile unterteilte, je weiter sie zur extensiven Unendlichkeit, zum unendlich Großen vordrang, desto mehr war sie zum Gebrauch nicht eindeutiger Konstruktionen berechtigt. Galileis astronomische Ansichten verloren an Bestimmtheit, je mehr sie sich von der Sonne, dem einzigen von ihm zugelassenen Zentrum des Weltgebäudes entfernten. Ein Schema endlicher, vom Zentrum der Sonne gleich weit entfernter Sphären ist das erste Glied der Konzeption Galileis.

Die weiteren Konturen der Galileischen Kosmosvorstellungen verschwimmen. Die Fixsternsphäre wird konventionell beschrieben. Dem Raum und dem Weltall im ganzen schreibt Galilei weder Endlichkeit noch Unendlichkeit zu. Er zweifelt an der Lösbarkeit dieses Problems. Aber die große Unbestimmtheit der Vorstellungen von dem, was wir heute als Weltall im ganzen bezeichnen, und eine gewisse Unbestimmtheit der Stellarastronomie Galileis vermindert nicht die bewundernswerte Prägnanz und Exaktheit seines Schemas in dem Bereich, dessen Zentrum die Sonne ist. Dieses sowohl den Keplerschen Gesetzen als auch der Descartesschen Trägheitsvorstellung und der Newtonschen Auffassung widersprechende Schema der Kreisbewegungen erweist sich unter dem Blickpunkt der Gegenwart als ein Komplex von Aporien und Problemen, der von unserem Jahrhundert eine Lösung verlangt und sie in der allgemeinen Relativitätstheorie findet. In der Kühnheit, Klarheit und bewundernswürdigen Anschaulichkeit dieses Schemas verkörpern sich die Wesenszüge der Renaissancekultur.

Kehren wir zum Beweis des heliozentrischen Weltsystems zurück. Er ergibt sich vor allem aus den astronomischen Beobachtungen, wonach die Planeten der Erde teils näher, teils ferner stehen. Mars, Jupiter und Saturn sind der Erde am nächsten, wenn sie der Sonne gegenüber in Opposition stehen.

Simplicio bittet darum, die Struktur der Welt durch eine Zeichnung zu erklären. Galilei erreicht hier einen Höhepunkt an Klarheit, Überzeugungskraft und Scharfsinn. Salviati trägt Simplicio auf, das kopernikanische Schema darzustellen. Er wendet sich an Simplicio mit den Worten: „Dieses weiße Papier sei die unermeßliche Ausdehnung des Weltalls, innerhalb deren Ihr seine Teile anordnen und zueinander stellen mögt, wie die Vernunft es Euch vorschreiben wird.“[41]

Simplicio ist natürlich davon überzeugt, daß sich die Erde nicht innerhalb des Sonnenkörpers befindet. Er zeichnet daher nach Salviatis Vorschlag in der Zeichnung Erde und Sonne als zwei willkürlich gewählte Punkte ein. Der klassische

[41] G. Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, a. a. O., S. 337.

sokratische Beweis wird fortgesetzt. Wo ist in der Zeichnung die Venus unterzubringen? Sie entfernt sich niemals weiter von der Sonne als um 46 Winkelgrade, steht niemals zur Sonne in Opposition, sie scheint am größten, wenn sie sich abends, und am kleinsten, wenn sie sich morgens der Sonne nähert. Hieraus muß Simplicio folgern, daß sich die Venus auf der gleichen Seite der Erde befindet wie die Sonne. Wenn sie sich der Erde nähert, steht sie zwischen Erde und Sonne und bei maximaler Entfernung von der Erde hinter der Sonne. Simplicio ist genötigt, die Bahn der Venus um die Sonne so zu zeichnen, daß sie nicht die Erde umfaßt. Weiter fordert Salviati von Simplicio, die Bahn des Merkurs zu zeichnen. Dieser Planet steht der Sonne noch näher als die Venus; daher trägt Simplicio in seine Zeichnung innerhalb des Kreises der Venus einen kleineren Kreis ein. Wo ist nun Mars anzusetzen? Die Opposition des Mars und das Fehlen von Phasen zwingen Simplicio, anzuerkennen, daß Mars innerhalb seiner Bahn sowohl Erde als auch Sonne einschließt.

In analoger Form zeichnet Simplicio die Bahnen von Jupiter und Saturn. Auch für den Mond findet er einen Platz im Sonnensystem. Schließlich siedelt er die Fixsterne in einem Bereich an, der die früher bezeichneten Planetenbahnen umfaßt. Darauf sagt Salviati: „Wir haben also bis jetzt, Signore Simplicio, die Weltkörper genau nach dem System des Kopernikus geordnet, und zwar ist dies von Euerer eigenen Hand geschehen.“[42]

Nun sprechen alle aufgezählten Argumente nur für die Möglichkeit des heliozentrischen Systems. Worin besteht aber der entscheidende Vorzug dieses Systems gegenüber dem geozentrischen?

Im „Dialog“ finden wir die Marginalie „Höchst bedeutsames Argument zugunsten des Kopernikus ist die Beseitigung des Stillstehens und Rückwärtsgehens bei den Planetenbewegungen.“[43] Sagredo fragt, wie Kopernikus dieses unwahrscheinliche Stehenbleiben, Rückwärts- und Vorwärtsgehen der Planeten erklärt. Salviati entgegnet, daß die heliozentrische Auffassung alle Verletzungen der Gleichförmigkeit in den Bereich der sichtbaren Erscheinungen verweist, da die Welt der wahren Bewegungen keine Beschleunigungen kennt. „Ihr werdet diese Vorgänge derart erklärt finden, Signore Sagredo, daß schon diese Theorie allein ausreichen müßte, um jeden, der nicht mehr als starrköpfig und unlenkbar ist, zur Beistimmung auch zu den übrigen Teilen der Lehre zu veranlassen. Ich teile Euch also mit, daß ohne jedwede Änderung an der 30jährigen Periode des Saturn, der 12jährigen des Jupiter, der 2jährigen des Mars, der 9monatlichen der Venus und der etwa 80tägigen des Merkur die bloße jährliche Bewegung zwischen Mars und Venus die anscheinende Ungleichheiten in den Bahnen der fünf genannten Gestirne verursacht.“[44]

Galilei stellt somit dem unmittelbar von der sinnlichen Wahrnehmung erfaßbaren Bild der Bewegung der Himmelskörper ein rationales Schema echter Bewegungen entgegen. Sie müssen die sichtbaren Bewegungen in möglichst einfacher Form erklären.

[42] Ebenda, S. 340.
[43] Ebenda, S. 358.
[44] Ebenda.

Neben den bereits erwähnten Beweisen des kopernikanischen Systems enthält der „Dialog" auch den Versuch eines direkten Beweises der Erdbewegung. Es geht um die Theorie der Gezeiten. Galilei maß ihr so große Bedeutung bei, daß er seinen „Dialog" zuerst „Ebbe und Flut des Meeres" nennen wollte. Aber die katholische Zensur nötigte ihn, den Titel des Buches zu ändern. Im Vatikan glaubte man, daß es keine objektiven physikalischen Beweise für die Wahrheit des kopernikanischen Systems geben könne. Dies entsprach der von Osiander ausgehenden Tradition. Nun ließen die Gezeiten nach der von Galilei entwickelten Theorie darauf schließen, daß die Erdbewegung objektiv existiert. Man hielt es deshalb im Vatikan für unzulässig, die Theorie der Gezeiten in Galileis Arbeit besonders hervorzuheben.

Galileis Theorie von Ebbe und Flut ergibt sich aus dem gesamten voraufgegangenen Inhalt seines „Dialogs". Infolge der Relativität der Inertialbewegung ist es unmöglich, die Erdbewegung mit Hilfe fester Körper zu bestimmen. Hieraus folgt nach Galilei, daß sie nur an Flüssigkeiten erwiesen werden kann. Er analysiert die Bewegung der Wasserpartikel auf der Erdoberfläche. Die Erde zieht jedes Partikel bei ihrer 24stündigen Drehung mit sich fort. Für einen außerhalb der Erde befindlichen Beobachter bewegt sich dieses Teilchen 12 Stunden nach der einen und dann 12 Stunden nach der anderen Richtung. Gleichzeitig bewegt sich das Wasserpartikel mit der Erde vorwärts, da es an ihrer Bewegung um die Sonne teilhat. Folglich fallen im Verlaufe von 12 Stunden die jährliche und die 24stündige Bewegung in der Richtung zusammen, während sie in der zweiten Tageshälfte entgegengesetzt sind. Einmal in 24 Stunden ist die Geschwindigkeit der Wasserpartikel der Summe der Geschwindigkeiten der 24stündigen und jährlichen Erdbewegung gleich, aber nach 12 Stunden ist sie gleich ihrer Differenz. Das Meereswasser wird mit dem Wasser verglichen, das sich in einem großen Schiff befindet. Wenn sich die Schiffsbewegung beschleunigt, so wird der Wasserspiegel am Heck gehoben, wenn sie sich verlangsamt, fließt das Wasser zum Bug. In dem Zeitpunkt, da die 24stündige Bewegung der Erde mit der jährlichen zusammenfällt und die Bewegung der Erdoberfläche beschleunigt wird, strebt die Wassermasse nach Westen, in der zweiten Tageshälfte nach Osten.

In den Erscheinungen Ebbe und Flut, wie sie Galilei auffaßt, wirkt die Trägheit als Kraft. Die Umwandlung der Trägheit in eine Kraft zeugt vom absoluten Charakter der beschleunigten Bewegung. Somit schränkt die Theorie von Ebbe und Flut das Prinzip der Relativität auf gleichförmige Bewegungen ein. Den Gezeiten in der Sicht Galileis entspricht Newtons bedeutsames Experiment, bei dem das Wasser am Rand eines sich drehenden Gefäßes hochsteigt. Durch das Vorhandensein einer Zentrifugalkraft wird damit die Absolutheit der Umdrehung und die Existenz eines absoluten Raumes bewiesen. Galileis Gezeitentheorie erfüllt eine ähnliche Aufgabe. Am zweiten Gesprächstag wendet sich Salviati mit Hilfe des Relativitätsprinzips gegen die Möglichkeit kinematischer Beweise für die kosmische Inertialbewegung. Dabei muß Salviati dynamische Beweise für die Realität einer derartigen Bewegung anführen, muß nachweisen, daß sich die Erde tatsächlich bewegt. Für Newton und die nach ihm lebenden Gelehrten

schien die Zentrifugalkraft, bedingt durch die Bewegung der gekrümmten Erdoberfläche, der Beweis für die absolute Erdbewegung zu sein. Für Galilei ist hingegen die der absoluten Geschwindigkeit nach konstante Bewegung entlang einer gekrümmten Bahn nicht beschleunigt. Eine solche Bewegung führt in die Mechanik nicht die Begriffe der Beschleunigung und der Kraft ein. Ein dynamischer Beweis der absoluten Erdbewegung konnte deshalb nur durch die Vorstellung einer Beschleunigung der ungeradlinigen Bewegung gewonnen werden. Diese Beschleunigung wurde durch Addition oder Subtraktion der zwei im heliozentrischen System eingeführten Erdbewegungen gewonnen.

Nach Galilei verleihen die Gezeiten dem kopernikanischen System objektive physikalische Bedeutung. Galilei entwickelt die Theorie von Ebbe und Flut als Antwort auf Osianders Vorwort und auf die Versuche, das Kriterium der objektiven Wahrheit aus der Astronomie zu eliminieren und auf formale Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen. Er sprach zwar vielfach von der rein formalen Anerkennung des kopernikanischen Systems, doch seine Ausführungen im „Dialog" und in anderen Arbeiten ließen diesen Vorbehalt bedeutungslos werden. Am 23. September schrieb Galilei an Cesi: „Wenn die Erde unbeweglich ist, so können Ebbe und Flut nicht stattfinden, wenn sich aber die Erde mit den ihr bereits zugeschriebenen Bewegungen bewegt, so ist es unumgänglich, daß Ebbe und Flut mit allen bei ihnen beobachteten Besonderheiten statthaben."[45]

Am Ende seines Lebens, erblindet und von der Inquisition zum Schweigen über seine wissenschaftlichen Arbeiten verurteilt, erinnert Galilei seinen venetianischen Bekannten Fulgenzio Micanzio an die Gezeiten der Adria: „Wenn das Meer in den Kanal Malamocco eintritt oder in Due Castelli und über die Ufer tritt, und die Lagune hinter Venedig, hinter Murano und hinter Marghera anschwillt, bis zu den letzten Sandbänken in Richtung auf Treviso, so folgt, daß bei Ebbe das Wasser um Due Castelli oder in der Nähe des Malamocco früher steigt, als es in Venedig in Murano und den anderen, weiter entfernten Orten zu sinken beginnt. Ich ziehe aus dieser Erscheinung, wenn sie gerade so verläuft, den Schluß, daß man diese Naturerscheinung mit der gleichen Bezeichnung belegen kann, die auch für andere Wasserbewegungen ganz normal ist, daß nämlich die Flut eine große Woge ist, die sich in der Weise bewegt, daß die unzähligen kleinen Wasser, die bei uns Schaumwellen genannt werden, weit über die Ufer des Meeres treten, dann aber, ohne einen Augenblick der Ruhe, zurückfluten. Ich habe diese Erscheinung oftmals in Venedig beobachtet und gesehen, daß das Wasser, wenn es steigt, gleichsam mit irgendwelchen Hebeln bewegt wird, die es emporheben, allmählich floß das Wasser in den angrenzenden Kanal ab, und wenn es aufgehört hatte abzufließen, so wandte es sich augenblicklich zurück, wie ich feststellen konnte. Selbst in meiner Finsternis", schließt der blinde Galilei, „höre ich also nicht auf, bald über diese, bald über jene Naturerscheinung Überlegungen anzustellen, und ich vermag meinem ruhelosen Gehirn keine Ruhe zu geben, wie ich es möchte. Diese Aufregung schadet mir sehr, da sie mich zwingt, ständig wach zu bleiben."[46]

[45] G. Galilei, in: Le opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale, Vol. XIII, p. 209.

[46] G. Galilei an F. Micanzio am 30. Gennaio 1538, in: Le opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale, vol. XVII, Firenze 1906, p. 307.

Seit Galilei sehen die Menschen die Natur mit anderen Augen an. Sie fassen sie als unendliches Forschungsfeld auf, und diese Forschung bedient sich irdischer, weltlicher, rationaler Methoden. Sie basieren auf der Erklärung aller Naturerscheinungen durch die Gesetze der Mechanik. Die Mechanik liefert eine universelle Naturerklärung. Sie hat keine Grenzen, und die Wissenschaft entwickelt sich als Mechanik ebenso grenzenlos wie die Natur selbst. Die Wissenschaft wird zu einem System mechanischer Ursachen und Wirkungen. Dies wurde auch Grundlage der mechanischen Naturwissenschaft. Sie war nicht nur die Summe einzelner Wissenschaftszweige, sondern auch eine neue Wissenschaft für breite Kreise.

Unter diesem Gesichtspunkt sind der Prozeß von 1633 und das persönliche Schicksal Galileis für die Geschichte der Naturwissenschaft von wesentlicher Bedeutung. Durch sie wird die gesellschaftliche Rolle und die Weltanschauung Galileis, die gesellschaftliche Bedeutung des „Dialogs" sichtbar. Das Erscheinen dieses Buches rief einen Sturm hervor. Im Herbst 1633 wurde Galilei vor das Inquisitionsgericht nach Rom geladen. Der kranke siebzigjährige Greis wurde eingekerkert und Verhören unterzogen. Nach dem Urteilsspruch der Inquisition mußte Galilei seine häretischen Ideen abschwören. Bis zu seinem Lebensende befand er sich unter ständiger Aufsicht der Inquisition. Es war ihm verboten, sich mit Astronomie zu beschäftigen, sich mit Gelehrten zu treffen und vor allem darüber zu sprechen, was vor dem Inquisitionsgericht geschehen war. Im Jahre 1642 starb Galilei in Anwesenheit seiner Schüler Viviani und Toricelli und von Vertretern der Inquisition. Letztere sollten darauf achten, daß Galilei vor seinem Tode seinen Schülern nichts astronomische Probleme Betreffendes mitteilte. Die Kirche erlaubte nicht, Galilei in seiner Familiengruft beizusetzen und ihm ein Grabmal zu errichten.

Galileis Zeitgenossen wunderten sich darüber, daß sich der große Gelehrte nicht aus der stürmischen und gefährlichen Atmosphäre kämpferischer Auseinandersetzungen, polemischer Pamphlete und publizistischer Angriffe in die Stille wissenschaftlicher Forschungsstätten zurückzog. Man könnte denken, daß Galileis Schicksal anders gewesen wäre, wenn er die astronomische Diskussion nicht aus den ruhigen Observatorien auf die Straßen von Florenz und Rom getragen hätte.

Später sagten Verteidiger des Katholizismus, die Inquisition habe nicht den Gelehrten, sondern den gesellschaftlichen Kämpfer Galilei verfolgt. In Wirklichkeit sind wissenschaftliche Forschung und gesellschaftlicher Kampf in Galileis Werk untrennbar verbunden. Die Inquisition verurteilte Galilei, weil die Wissenschaft in seinen Händen zu einer gewaltigen gesellschaftlichen Kraft geworden war, die sich gegen die überlebten Gesellschaftsverhältnisse richtete. Galilei hätte den Verfolgungen durch die Inquisition entgehen können, wenn er seine wissenschaftliche Tätigkeit ohne direkten gesellschaftlichen Bezug betrieben hätte. Dann hätte er aber von der Verwendung des Teleskops für den anschaulichen, überzeugenden und breiten Kreisen zugänglichen Beweis neuer Weltvorstellungen Abstand nehmen müssen. Dann hätte aber Galilei nicht seine mechanische Begründung des neuen Weltbildes zu geben vermocht, welche die Wissenschaft weitgehend von der Theologie emanzipierte. Er hätte auch nicht das kopernika-

nische System in einer Sprache darlegen können, die ihn zum Schöpfer der modernen italienischen Prosa gemacht hat. Mit einem Wort — Galilei hätte den Verfolgungen nur dann entgehen können, wenn er aufgehört hätte, Galilei zu sein.

Galileis Prozeß bezeichnet den Anfang einer erbitterten Reaktion, die für lange Zeit die Entwicklung der Naturwissenschaften in Italien hemmte. Auf dieser Basis entwickelten sich auch der Terror der Inquisition und die Tätigkeit der Jesuiten. Nach dem Tode der Schüler Galileis setzt in der Geschichte der italienischen Wissenschaftsentwicklung eine lange Verfallsperiode ein. Die sehr bescheidenen wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Periode sind mit denen zu Beginn des 17. Jahrhunderts nicht zu vergleichen.

6. „Unterredungen und mathematische Demonstrationen“

Galileis „Dialog“ hatte für Stil, Methode und Charakter des wissenschaftlichen Denkens, für die Weltanschauung breiter Gesellschaftskreise, für die Verbreitung des heliozentrischen Weltbildes außerordentlich große Bedeutung. Ein anderes Werk Galileis war aber für die Mechanik noch bedeutsamer.

Nach seinem Verhör, als er sich unter strenger Aufsicht der Inquisition befand, siedelte Galilei nach Arcetri bei Florenz über. Hier verfaßte er die „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“, die „Discorsi“. Das Buch wurde Anfang 1635 beendet, und vier Jahre später gelang es, die „Discorsi“ in Leiden zu drucken, das protestantisch war.

Im Vorwort zur Leidener Ausgabe wird gesagt, welche neuen Wissenschaften in den „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen“ behandelt werden: die Dynamik und die Festigkeitslehre.

In diesem Buche begegnen wir erneut Salviati, Sagredo und Simplicio. Letzterer ist hier nicht mehr Vertreter der scholastisch-peripatetischen Weltauffassung. Simplicio ist die erinnernde Person des Dialogs, die mit ihren Fragen und Antworten Sagredo und Salviati hilft, Galileis Auffassungen darzulegen. Die „Unterredungen“ beginnen mit einem Austausch von Eindrücken über das venezianische Kriegsarsenal. Salviati sagt: „Die unerschöpfliche Tätigkeit Eures berühmten Arsenals, Ihr meine Herren Venetianer, scheint mir den Denkern ein weites Feld der Spekulation darzubieten, besonders im Gebiete der Mechanik: da fortwährend Maschinen und Apparate von zahlreichen Künstlern ausgeführt werden, unter welch letzteren sich Männer von umfassender Kenntnis und von bedeutendem Scharfsinn befinden.“[47]

Sagredo greift Salviatis Gedanken auf und führt sie weiter, wobei er die Produktionserfordernisse den Berufungen auf die antiken Autoritäten und der Wiederholung ihrer Meinungen gegenüberstellt.

[47] G. Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, aus dem Ital. übers. u. hrsg. v. A. von Oettingen, Leipzig 1890, S. 3 (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 11).

Das Gespräch berührt die verschiedenartigsten Probleme. Galilei schrieb die „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen" als sein Vermächtnis und bezog in sie Forschungsarbeiten aus verschiedenen Lebensetappen ein.

Am ersten Tage beginnen die „Unterredungen" mit der Frage nach den Ursachen und dem Maß der Kräfte, die die einzelnen Teile der Körper verbinden. Diese Frage ist charakteristisch für den Zusammenhang zwischen den produktionstechnischen Interessen jener Zeit und den grundlegenden naturwissenschaftlichen Problemen. Die Struktur und Schwere eines Stoffes, der Zusammenhang seiner diskreten Teile steht im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Weltbildes. Gleichzeitig hatte diese Frage im 17. Jahrhundert erstrangige Bedeutung für technische Anwendungen und ergibt sich in den „Discorsi" direkt aus den angeführten Bemerkungen über das venetianische Arsenal.

„Sie denken vielleicht an jenen Satz, den ich Ihnen neulich vortrug, als wir ein Verständnis dafür suchten, weshalb man so viel größere Gerüste erbaut, um jene große Galeere vom Stapel zu lassen, während man sie lange nicht in demselben Maße kleiner für kleinere Schiffe gebraucht, wobei Sie bemerkten, es geschehe das, um die Gefahr des Zerbrechens durch den Druck der ungeheuren Last zu vermeiden, ein Umstand, dem die kleinen Holzmassen nicht ausgesetzt seien."[48]

Bei Erklärung der Verkettung der Körperelemente beruft sich Galilei auf den „horror vacui" und entwickelt, wie ihm scheint, eine Methode, diesen Widerstand gegen die Erzeugung eines Vakuums quantitativ in verschiedenen Materialien zu bestimmen. Wasser kann durch Pumpen nicht mehr als 20 Ellen gehoben werden. Dementsprechend soll gezeigt werden, „wie von all den Metallen, Steinen, Hölzern, Gläsern etc. man leicht finden könne, bis zu welcher Länge man einen jeden Zylinder bringen kann, seien es Drähte oder Stäbe von beliebiger Dicke; über welchen Betrag hinaus dieselben infolge der eigenen Last brechen müßten."[49]

Galilei erklärt das Problem der mechanischen Ähnlichkeit. Eine Maschine, die einer anderen geometrisch ähnlich, aber kleiner als diese ist, unterscheidet sich von ihr hinsichtlich ihrer mechanischen Festigkeit. Folglich wirken neben den sichtbaren Kräften der Makrowelt, die einander ähnliche Körper gleich beständig machen würden, Kräfte einer anderen, unsichtbaren Welt.

Salviati weist nach, daß der „horror vacui" die Verkettung der Körperteile nur teilweise erklärt. Worin besteht aber nun die Restursache? Er war der Meinung, daß neben der makroskopischen Leere der physischen Welt noch ein mikroskopisches Vakuum existiert. Die Mikrovakua zwischen den Teilchen der Stoffe verbinden sie: die Natur fürchtet die Leere und verhindert ihre Vergrößerung. In ihrer Gesamtheit rufen diese winzigen Kräfte eine außerordentliche Festigkeit der Materialien hervor. Wird das Vakuum durch irgendeinen Stoff ausgefüllt, so wird die Kohäsion der Teilchen beseitigt. Galileis Theorie des Schmelzens sieht demgemäß wie folgt aus: in die Poren zwischen den Teilchen eindringendes Feuer trennt diese Teilchen, durch die Beseitigung des Feuers werden sie wieder verbunden, und das geschmolzene Metall gewinnt erneut Festig-

[48] Ebenda, S. 3f.
[49] Ebenda, S. 17.

keit. Übrigens hält sich Galilei nicht bei ausführlichen, eigentlich physikalischen Schlußfolgerungen aus der Konzeption des mikroskopischen Vakuums auf. Ihn interessiert das allgemeine naturphilosophische Problem der Struktur des Stoffes. Unter diesem Aspekt besteht die Hauptschwierigkeit der Theorie des mikroskopischen Vakuums darin, daß sie die Festigkeit der Körper auf die ihrer Teilchen reduziert und somit auf den ersten Blick das Problem lediglich verschiebt, aber nicht löst. Wodurch wird nun wiederum die Festigkeit der materiellen Teilchen des Stoffes erklärt? Nach Salviati durch das Vorhandensein noch kleinerer Teilchen und dementsprechend noch kleinerer Vakua. Seine Opponenten fragen, ob nun diese Übertragung des Problems bis ins Unendliche fortgeführt werden kann. Salviati findet gerade in der Vorstellung von der unendlichen Teilbarkeit des Stoffes im unendlich kleinen Vakuum die Antwort auf eine der Grundfragen der Naturwissenschaft — die Frage nach dem Wesen der Festigkeit und Haltbarkeit von Körpern und der wechselseitigen Verbindung ihrer Teile.

Im weiteren Verlauf wendet sich das Gespräch der Möglichkeit einer unendlichen Zahl von Vakua im endlichen Körper zu. Salviati weist nach, daß selbst die subtilste Teilbarkeit in subtilstes Pulver die Körper nicht in eine Flüssigkeit umwandelt. Das Pulver ist, wie Salviati feststellt, davon verschieden und besteht aus unendlich kleinen und unteilbaren Teilchen. „Daraus kann man wohl schließen, daß die kleinsten Teile des Wassers, aus welchen dasselbe zu bestehen scheint (denn es ist feiner als das feinste Pulver ...) etwas ganz anderes sind, als die endlichen kleinsten, zudem teilbaren Teile, und ich finde keinen anderen Unterschied, als den des Unteilbaren.“[50] Galilei erklärt die qualitativen Unterschiede zwischen festen und flüssigen Körpern durch die quantitative Unvergleichbarkeit endlicher und unendlich kleiner Vakua.

Am dritten und vierten Gesprächstag lesen und kommentieren Salviati, Sagredo und Simplicio Galileis Abhandlung „über die örtliche Bewegung“.

Einige Gelehrte, schreibt Galilei, haben die beschleunigte Bewegung fallender Körper konstatiert. Aber bislang hat noch niemand das Maß der Beschleunigung bestimmt. In bezug auf geworfene Körper war die Krümmung ihrer Flugbahn schon vor Galilei festgelegt worden. Aber erst Galilei fand, daß ihre Bewegung eine Parabel beschreibt. Er sagt: „... zudem wird die Bahn geebnet, zur Errichtung einer sehr weiten, außerordentlich wichtigen Wissenschaft, deren Anfangsgründe diese vorliegende Arbeit bringen soll, in deren tiefere Geheimnisse einzudringen Geistern vorbehalten bleibt, die mir überlegen sind.“[51]

Der Traktat „Über die örtliche Bewegung“ besteht aus drei Teilen. Im ersten wird die gleichförmige Bewegung untersucht, im zweiten die gleichförmig beschleunigte Bewegung beschrieben und im dritten Teil die erzwungene Bewegung oder die von Wurfgeschossen behandelt.

Bei der Definition der gleichförmigen Bewegung bringt Galilei eine wesentliche Korrektur an. Bis zu ihm wurde sie als eine Bewegung bestimmt, bei der der Körper gleiche Entfernungen in gleichen Zeitabschnitten zurücklegt. Galilei

[50] Ebenda, S. 39.
[51] G. Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen, Leipzig 1891, S. 3f. (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 24).

fügt dieser Definition lediglich einige Worte hinzu: „Ich nenne diejenige Bewegung gleichförmig, bei welcher die in irgendwelchen gleichen Zeiten vom Körper zurückgelegten Strecken untereinander gleich sind.“[52] Diese Worte („in irgendwelchen gleichen“) bedeuten, daß sich die Geschwindigkeit auf unendlich kleine Wegabschnitte beziehen kann. Wenn man diesen Vorbehalt nicht macht, wäre es möglich, „daß in gewissen Zeiten gleiche Strecken, dagegen in kleineren gleichen Teilen dieser selben Zeiten ungleiche Strecken zurückgelegt werden“.[53]

Folglich nähert sich Galilei der modernen Vorstellung von der Geschwindigkeit als eines Differentialquotienten des Weges nach der Zeit. Bei der gleichförmigen Bewegung verändert sich die Geschwindigkeit im Verlaufe eines beliebigen Zeitabschnittes nicht, wie klein er auch sein mag.

Galilei spricht weiter von der gleichförmig beschleunigten Bewegung — vom freien Fall. Nach seiner Auffassung kann man beliebige Formen der beschleunigten Bewegung untersuchen, er aber will sich auf die wirklich in der Natur existierende universelle beschleunigte Bewegung beschränken. Denn dadurch ist es möglich, die theoretischen Berechnungen mit den empirischen Beobachtungen zu vergleichen.

Bei der Diskussion des Abschnitts der „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen“, der die gleichförmige Beschleunigung behandelt, erklären die Gesprächspartner die kontinuierliche Bewegung, indem sie den Begriff der Beschleunigung in einem Punkt einführen. Nachdem Salviati das stetige Wachstum der Geschwindigkeit entwickelt hat, bemerkt Simplicio, wenn es unendlich viele Werte für die zu- oder abnehmende Geschwindigkeit gäbe, könnten sie niemals sämtlich realisiert werden. Ein nach oben geworfener Stein könnte somit niemals zur Ruhe gelangen, sondern müsse in unendlicher gleichförmig verlangsamter Bewegung verharren. Salviati löst dieses alte Paradoxon mit dem Hinweis auf die unendlich kleinen Maße des Augenblicks, da der Körper eine bestimmte Geschwindigkeit inne hat. „Es würde zutreffen, Herr Simplicio, wenn der Körper einige Zeit hindurch sich in jedem Geschwindigkeitsgrade bewegen würde, allein er geht über einen jeden Wert sofort hinaus, ohne mehr als einen Augenblick bei demselben zu verweilen und da in einem jeden auch noch so kleinen Zeitteilchen es unendlich viele Augenblicke gibt, so sind diese letzteren recht wohl hinreichend, den unendlich vielen Graden von verminderter Geschwindigkeit zu entsprechen.“[54]

Galilei gelangt somit bei Darlegung seiner Dynamik von der Geschwindigkeit zur Beschleunigung. Historischer Ausgangspunkt der neuen Dynamik ist der Begriff der beschleunigten Bewegung. Die ursprüngliche Vorstellung von der Geschwindigkeit ist die von einem Zeitraum, währenddessen ein Körper von einem Raumpunkt in einen anderen übergeht, bzw. von der Entfernung, die von einem Körper in einem bestimmten Zeitintervall zurückgelegt wird. Mit anderen Worten: Die ursprüngliche traditionelle Vorstellung von der Geschwindigkeit bestimmt sie als Quotient des zurückgelegten Weges durch die Zeit. Diese Größe

[52] Ebenda, S. 4.
[53] Ebenda.
[54] Ebenda, S. 13f.

sagt nichts über die Geschwindigkeit eines Körpers im gegebenen Punkt aus und entspringt daher der Vorstellung von der gleichförmigen Bewegung. In der Praxis hatte man es vielfach mit einer beschleunigten Bewegung zu tun, vor allem mit fallenden Körpern. Gerade deshalb wurde die Geschwindigkeit von Galilei als sich kontinuierlich verändernde Größe dargestellt. Wie wir sehen, löst er die Bewegungsparadoxa, indem er betont, daß dem unendlich kleinen Wegabschnitt eine bestimmte Geschwindigkeit eigen ist. Dementsprechend war auch der Bewegungsbegriff zu verändern. Für Galilei ist die Geschwindigkeit das Verhältnis eines unendlich kleinen Wegelementes zu einem unendlich kleinen Zeitelement. Diese Geschwindigkeitsvorstellung ist umfassender als die ursprüngliche. Man kann aus ihr im Spezialfall die alte, der gleichförmigen Bewegung entsprechende Geschwindigkeitsvorstellung ableiten. Galilei formulierte keine derartige Definition der Geschwindigkeit, er benutzte sie aber ständig. Die Auffassung der Geschwindigkeit als eines Grenzwertes, dem sich der Quotient von Weg und Zeit bei unendlicher Verkleinerung des einen oder des anderen unendlich annähert, ergibt sich aus dem Gedanken der kontinuierlichen Veränderung der Geschwindigkeit, aus dem Begriff der Beschleunigung.

Im weiteren Gespräch entwickelt Salviati eine historisch sehr interessante Auffassung Galileis. Der Begründer der Mechanik hielt es für möglich, den Fall der Körper zu untersuchen, ohne die physikalischen Ursachen der Schwerkraft zu kennen. Salviati führt aus: „Es scheint mir nicht günstig, jetzt zu untersuchen, welches die Ursache der Beschleunigung der natürlichen Bewegung sei, worüber von verschiedenen Philosophen verschiedene Meinungen vorgeführt worden sind; einige führen sie auf die Annäherung an das Zentrum zurück; andere darauf, daß immer weniger Teile des Körpers auseinander gehen wollen; wieder andere auf eine gewisse Vertreibung des umgebenden Mittels, welches hinter dem fallenden Körper sich wieder schließt und den Körper antreibt und von Stelle zu Stelle verjagt; alle diese Vorstellungen und noch andere müssen geprüft werden und man wird wenig Gewinn haben."[55]

Dies ist die Keimform der Physik der Newtonschen Prinzipien: Galilei untersucht nicht die physikalischen Ursachen des Falls, sondern beschäftigt sich mit der mathematischen Seite des Problems. Er gibt folgende Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung: „Gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung nenne ich diejenige, die von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwüchse erteilt."[56]

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist der zurückgelegte Weg dem Quadrat der Zeit proportional.

Galilei entwickelt weiter die Gesetze des Falls der Körper. Das grundlegende Gesetz der Fallbewegung wurde übrigens schon am Ende des ersten Gesprächstages beschrieben, im Zusammenhang mit Problemen des Vakuums. Hier widerlegt Galilei Argumente des Aristoteles gegen die Existenz des Leeren. Für Aristoteles ist die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Körpers der Dichte der Um-

[55] Ebenda, S. 15.
[56] Ebenda, S. 11.

gebung umgekehrt proportional. Deshalb würde die Bewegung im leeren Raum mit der Dichte Null bei völligem Fehlen eines Widerstandes eine unendliche Geschwindigkeit gewinnen, und der Körper würde momentan durch die Leere hindurchgegangen sein. Aus der Unmöglichkeit einer derartigen Bewegung schließt Aristoteles auf die Unmöglichkeit der Leere. Galilei antwortet auf dieses Argument, indem er seine Auffassung von der endlichen und für alle Körper konstanten Fallgeschwindigkeit im Vakuum entwickelt. Die Vorstellung, wonach schwere Körper schneller als leichte fallen, wird von Galilei durch ein sehr einfaches Gedankenexperiment widerlegt. Ein großer Stein fällt mit acht Maß Geschwindigkeit und ein anderer, kleinerer Stein mit vier Maß. Vereinigen wir beide, so erhalten wir einen Körper, der sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von weniger als acht Maß bewegt. Nun bilden beide Steine zusammen einen schwereren Körper als die beiden ursprünglichen. Wir erkennen somit, daß sich ein schwerer Körper mit geringerer Geschwindigkeit als ein leichter bewegt. Diese Beweismethode benutzten schon die mittelalterlichen Nominalisten. Albert von Sachsen (14. Jahrhundert) sagte, daß zehn Steine mit der gleichen Geschwindigkeit wie ein Stein fallen müssen.

Galilei äußert dann in einem kleinen Exkurs einen außerordentlich interessanten Gedanken. Simplicio wendet gegen Salviatis Ausführungen ein, daß ein kleiner mit einem großen vereinigter Stein das Gewicht des größeren Steins und dementsprechend die Fallgeschwindigkeit erhöht. Salviati erwidert darauf, die Zufügung einer hinzugefügten Last vermöge das Gewicht nicht zu erhöhen. Man müsse den Unterschied zwischen einem ruhenden und einem sich bewegenden Körper beachten. Ein zu einem unbewegten Körper auf einer Waagschale hinzugefügter zweiter Körper wird das Gewicht vermehren. Fällt der Körper frei im Raum, so vergrößert der auf ihm liegende andere Körper das Gewicht nicht. „Fühlen wir nicht die Last auf unseren Schultern, wenn wir uns stemmen wollen gegen die Bewegung derselben; wenn wir aber mit derselben Geschwindigkeit uns bewegen, wie die Last auf unserem Rücken, wie soll denn letztere uns drücken und beschweren?"[57]

In einem System, das sich mit einer Beschleunigung auf die Erde zu bewegt, die der frei fallender Körper gleich ist, kann es keine physikalischen Erscheinungen geben, in denen sich die Schwerkraft der Erde äußert. Die Körper erfahren hinsichtlich dieses Systems keine Beschleunigung und verlieren gleichsam ihr Gewicht. Hier liegt der Ausgangspunkt für eine Reihe von dynamischen Schlußfolgerungen, die später große Bedeutung gewannen. Galilei fehlen verständlicherweise zu viele Begriffe der Dynamik, um hier weiterzukommen.

Methodologisch sind die folgenden Seiten der „Discorsi" von Interesse, in denen Galilei den Unterschied zwischen Wesentlichem und Unwesentlichem in den sichtbaren Erscheinungen aufzeigt. Simplicio erklärt, daß in der Wirklichkeit leichte Körper langsamer als schwere fallen. Salviati erwidert darauf: „Ihr werdet, *Herr Simplicio*, nicht wie Andere, das Gespräch von der Hauptfrage ablenken

[57] G. Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen, Leipzig 1890, a. a. O., S. 58.

und Euch an einen Ausspruch anklammern, bei welchem ich um Haaresbreite von der Wirklichkeit abweiche, indem Ihr unter dieses Haar verbergen wolltet den Fehler eines Anderen von Ankertau-Dicke."[58]

Die von Salviati zugelassene Abweichung von der Wirklichkeit ergibt sich aus dem Einfluß der Umwelt, der das einfache Fallgesetz verzerrt. Um dieses einfache und allgemeine Gesetz darzustellen, muß man die störenden zufälligen Umstände beseitigen, zu denen auch der Widerstand des Mediums gehört. Natürlich ist mit einer derartigen Ignorierung des Mediums als eines zufälligen Umstandes eine Konzeption inbegriffen, die durch lange empirische Beobachtung und praktische Anwendung von Prozessen geschaffen worden ist, in denen nur das Gewicht berücksichtigt und ausgenutzt wurde, während die Reibung, der Luftwiderstand usw. sich als zufällig, störend und als zu ignorierende Nebenumstände erwiesen hatten.

Im Verlaufe des dritten Gesprächstages werden die Fallgesetze ausführlicher erörtert. Von ihnen geht das Gespräch zur Theorie der schiefen Ebene über, wo die Gesetze der Dynamik experimentell überprüfbar werden.

Wir wollen zur Trägheitsauffassung zurückkehren, wie sie in den „Unterredungen" entwickelt wird.

In einem der ersten Absätze des Kapitels „Über die Wurfbewegung" ist das Trägheitsprinzip formuliert: „Wenn ein Körper ohne allen Widerstand sich horizontal bewegt, so ist aus allem Vorhergehenden, ausführlich Erörterten bekannt, daß diese Bewegung eine gleichförmige sei und unaufhörlich fortbestehe auf einer unendlichen Ebene."[59]

Man könnte meinen, daß es um das Gesetz der geradlinigen Trägheitsbewegung geht. Aber in Wirklichkeit ist die Ebene in den „Unterredungen" dieselbe wie im „Dialog". Sie entspricht der Erdoberfläche. Nur geht es hier nicht um astronomische Beobachtungen als empirische Grundlage der Gesetze der Mechanik, sondern um die Mechanik irdischer Körper, um die Bautätigkeit, die Ballistik usw. Galilei betrachtet dabei die Krümmung der Erdoberfläche als unwesentlich.

Schon vorher hatte er gesagt, daß die vertikalen Richtungen in den verschiedenen Punkten der Erdoberfläche als parallel angesehen werden können. Diese Frage hatte schon vor Galilei eine lange Geschichte. Die Vertreter mathematischer Exaktheit lehrten die Nichtparallelität der Schwerkraft sogar in der Hebeltheorie. Wissenschaftler, die praktischen Problemen näherstanden, nahmen von solchem Rigorismus Abstand.

Was erweist sich bei der Darstellung der Bewegung geworfener Körper als unwesentlich? Was wird eigentlich eliminiert? Ausgangsbegriff ist für Galilei die Bewegung eines Körpers, der eine gleiche Entfernung vom Erdzentrum behält. Das ist auch die Trägheitsbewegung. Kleine Entfernungen können dann als gerade Linie angesehen werden, und die Bewegung eines Wurfkörpers entspricht einer Parabel. In Wirklichkeit weicht die Bahn eines Wurfkörpers infolge der gekrümmten Erdoberfläche von einer Parabel ab.

[58] Ebenda, S. 59.

[59] G. Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen, a. a. O., Dritter und vierter Tag, S. 80f.

Diese irdischen Maßstäbe der Mechanik ermöglichen es Galilei, in diesem Bereich Vorstellungen von der trägen geradlinigen Bewegung zu verwenden, ohne mit der früher geäußerten Auffassung von der Gekrümmtheit der Trägheitsbewegung in Widerspruch zu geraten.

Wir haben bereits gesehen, daß die Vorstellung von der Leere die physikalische Voraussetzung der Dynamik des 17. Jahrhunderts war. Das gleiche wird auch in der Theorie der Inertialbewegung deutlich. Leonardo da Vinci und andere Gelehrte beschäftigten sich vor Galilei erfolgreich mit dem Inertialprinzip. Sie vermochten aber nicht den letzten Schritt zu tun, weil sie davon absahen, sich die Bewegung im absoluten Vakuum vorzustellen, wo der sich bewegende Körper keinem Hindernis begegnet. Die Dynamik des 17. Jahrhunderts erklärte in Galileis Person den Widerstand des Mediums als unwesentliche Seite ihrer Gesetze. Später wurde die gleichförmige Beschleunigung fallender Körper weitgehend offensichtlich, aber zu Beginn des Jahrhunderts schien eine derartige Behauptung dem Augenschein zu widersprechen. Der Nachweis, daß der Widerstand unwesentlich ist, zeigt die historischen Wurzeln dieser äußerst wichtigen Abstraktion und zugleich die allgemeinen Quellen der Mechanik des 17. Jahrhunderts.

Die Produktionsmechanik des 17. Jahrhunderts erforderte keine quantitative Analyse des Umweltwiderstandes und konnte dieser Aufgabe auch gar nicht gerecht werden. Zu Galileis Zeit konnte dieser Widerstand im Zusammenhang mit dem Entwicklungsstand der Technik und der Experimentalphysik als unwesentlich angesehen werden. Die Physik erbrachte Beweise für die Existenz des Vakuums. Die Konstruktion von Pumpen und die Erfahrungen, die das Vakuum als praktische Möglichkeit erwiesen, bezogen sich auf eine spätere Periode. Aber schon zur Zeit Galileis gab es genügend empirische Beobachtungen, die es ermöglichten, die Fall- und Trägheitsgesetze zu untersuchen, indem man sich den Körper gedanklich als sich im Vakuum bewegend vorstellte.

Soweit zu den Grundprinzipien der Dynamik Galileis. Galilei hat auch Gedanken zur dynamischen Begründung der Statik geäußert. Sie sind im Prinzip der virtuellen Verschiebungen zu sehen. Galilei betrachtet das Gleichgewicht mechanischer Systeme als Spezialfall der Bewegung und untersucht die Gleichgewichtsbedingungen, indem er von der Möglichkeit einer Gleichgewichtsverletzung ausgeht. Bei einer Störung des Gleichgewichts würden die Punkte eines mechanischen Systems in eine bestimmte Richtung verschoben werden. Diese möglichen Verschiebungen wurden später als virtuell bezeichnet. Sie sind Ausgangspunkt einer dynamischen Analyse der Gleichgewichtsbedingungen. Die das Gleichgewicht wahrenden Kräfte verhalten sich umgekehrt proportional zu den virtuellen Verschiebungen. Ausgehend von diesem Prinzip, kommt Galilei zu den Gesetzen der Statik, vor allem zum Hebelprinzip. Bei der weiteren Analyse der Gleichgewichtsbedingungen untersucht Galilei das Verhältnis zwischen Kraft und Verschiebung für das Gleichgewicht auf der schiefen Ebene und am Flaschenzug. Die umgekehrte Proportionalität zwischen den sich ausgleichenden Kräften und den virtuellen Verschiebungen erweist sich als allgemeines Prinzip. Hieraus ergibt sich, daß das Produkt der Kraft mit dem vom Körper zurückgelegten Weg, d. h. die Arbeit,

durch keine Maschine vergrößert werden kann und alles, was an Kraft gewonnen wird, an Weg verlorengeht.

Galileis Dynamik barg erste, manchmal noch unbestimmte Begriffe, die zum Ausgangspunkt einer systematischen Ausarbeitung der Mechanik und Physik wurden. Die Begriffe der Trägheit, der Geschwindigkeit in einem gegebenen Punkt, der beschleunigten Bewegung, der Addition einer beschleunigten Bewegung mit einer gleichförmigen wurden noch nicht eindeutig formuliert. Diese Begriffe wurden noch in unterschiedlichem Sinne gebraucht. Selbst der Gedanke von der Kontinuität der Materie und Bewegung, der in der Lehre vom Stoff und in der Dynamik Galileis von so großer Bedeutung war, wurde noch nicht als universelle, endgültige Voraussetzung des Naturstudiums definiert. Galileis Auffassungen bargen aber auch Vorstellungen von den Kräften und dem leeren Raum. Als nächster Schritt mußte die absolute Kontinuität der Materie proklamiert werden, die jeglicher anderen Eigenschaften außer den geometrischen entbehrte.

II. KINETIK

1. *Die Grundlagen der cartesischen Physik*

Galilei hatte in seinem „Dialog über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme" ein einheitliches, das ganze Weltgebäude umfassendes System von Inertialbewegungen entworfen. In ihrer weiteren Entwicklung mußte die Wissenschaft aber schließlich die kosmischen Beschleunigungen nachweisen und ihre Ursachen finden. Die „Unterredungen und Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige" enthielten einige dafür notwendige Begriffe aus der Mechanik irdischer Körper, aber Galilei übertrug sie nicht auf den Kosmos. Der „Dialog" und die „Unterredungen und Demonstrationen" waren noch längst nicht zu Elementen einer neuen, exakteren und konkreteren Weltvorstellung geworden. Die folgenden Schritte der Wissenschaft ermöglichten es, die Gedanken des „Dialogs über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme" mit der Theorie der beschleunigten Bewegung und vor allem mit den Fallgesetzen, die in den „Unterredungen und Demonstrationen" entwickelt worden waren, zu verbinden. Dazu war eine genauere Bestimmung der Trägheit erforderlich, nicht nur hinsichtlich der Erhaltung einer absoluten Geschwindigkeit, sondern auch der Richtung der Inertialbewegung.

Außerdem ergaben sich notwendige Voraussetzungen einer mechanischen Erklärung kosmischer Erscheinungen aus der Praxis. Sie lieferte Beobachtungen, die den Gedanken der Erhaltung der Bewegungsmenge bei elastischen Stößen zu formulieren ermöglichten. Dieser Gedanke schien, in die Mikrowelt übertragen, die Möglichkeit einer mechanischen Deutung der qualitativen Veränderungen zu eröffnen, also der Wärme, des Schalls, der Elastizität der Gase, des Lichtes, der Elektrizität, der Gravitation, der chemischen Stoffumwandlungen und schließlich der Phänomene des Lebens.

Zunächst existierte noch ein grundlegender Unterschied zwischen den astronomischen Erscheinungen einerseits und den physikalisch-chemischen, geologischen und biologischen Erscheinungen andererseits. Die Bewegung der Himmelskörper war schon zu jener Zeit verhältnismäßig exakt untersucht worden, als es noch keine Teleskope gab. Nach Galilei jedoch verwandelte sich die Astronomie schnell in eine Wissenschaft, die mit quantitativen Begriffen und exakten Messungen operierte, die eine umfassende und fruchtbare mathematische Verarbeitung zuließen. Die physikalischen, chemischen, geologischen und biologischen Erscheinungen befanden sich in einer anderen Situation.

Das Experiment war zu Beginn des 17. Jahrhunderts in diesen Bereichen vorwiegend qualitativ. Die Elektrizitätslehre gelangte erst hundertfünfzig Jahre

später zu quantitativen Ergebnissen. Vor der Wärmetheorie lag bis zur Anwendung genauer Thermometer ein fast ebenso langer Weg. Die Chemiker operierten bereits mit spezifischen Gewichten, aber die die Chemie umgestaltenden quantitativen Beobachtungen wurden erst Mitte des 18. Jahrhunderts vorgenommen. Ebenso war auch die Mineralogie zu Beginn des 17. Jahrhunderts über erste qualitative Beschreibungen noch nicht hinausgekommen. Die Optik entwickelte sich in unmittelbarer Wechselbeziehung mit der Astronomie und war gegenüber anderen Bereichen viel weiter entwickelt.

In jener Zeit konnte die verhältnismäßig gut ausgearbeitete Theorie der Bewegung auf physikalisch-chemische und biologische Erscheinungen nur mit Hilfe vieler Hypothesen angewandt werden.

Descartes unternahm den kühnen Versuch, alle damals bekannten Naturerscheinungen durch die mechanische Bewegung zu erklären. Er schuf ein Weltbild, in dem es nichts gab außer der sich bewegenden Materie. Dieses Weltbild umfaßte den Makro- wie den Mikrokosmos. Descartes verallgemeinerte eine gigantische Summe von Beobachtungen, gelangte vielfach zu einer richtigen Erklärung der physikalischen, chemischen und physiologischen Erscheinungen und entwickelte gleichzeitig viele phantastische Konstruktionen.

Die cartesische Physik wurde zu gleicher Zeit wie die Dynamik Galileis entwickelt, aber unter anderen historischen Bedingungen. Das historische Schicksal der Arbeiten Descartes' und seiner nächsten Anhänger, die Wirkung der cartesischen Physik auf die geistige Entwicklung Europas, und die konkreten Äußerungen des theoretischen Kampfes waren in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts in vielfacher Hinsicht von den ökonomischen, politischen und kulturellen Bedingungen in Frankreich und in den Niederlanden abhängig. Es ist die auf die Niederländische Revolution folgende Periode. Sie war in Frankreich durch Verstärkung des oppositionellen Denkens gekennzeichnet, das sich gegen die Jesuiten und die theologische Scholastik richtete.

Descartes war Zeuge des Entstehens verhältnismäßig großer Manufakturen in Frankreich und den Niederlanden. In Frankreich entstanden die „Königlichen Manufakturen", große Unternehmen mit Dutzenden von Arbeitern. In den Niederlanden wurden die Tuchmanufakturen und andere Bereiche der Manufakturproduktion zur Basis des wissenschaftlich-technischen Fortschritts. Descartes hat sich während seines ganzen Lebens für technische Fragen der Manufakturproduktion interessiert. Er unterhielt zu bürgerlichen Kreisen enge Verbindung. Einige Vertreter des dritten Standes wurden von ihm auf die wissenschaftliche Tätigkeit vorbereitet. Descartes entwickelte Lehrpläne für handwerkliche Spezialschulen. Von noch größerer Bedeutung ist, daß er wissenschaftliche Arbeiten in französischer Sprache schrieb und sich damit — ähnlich Galilei — nicht zur esoterischen Gruppe der Scholastiker, sondern zu den neuen, nichtprofessionellen Kreisen bekannte.

Der historische Zusammenhang zwischen dem Cartesianismus und der Entwicklung der angewandten Mechanik ist verhältnismäßig klar. Schwieriger ist seine Verbindung mit dem klassischen Kampf der Bourgeoisie gegen den Adel zu analysieren.

Descartes' Lebensjahre fielen in eine Zeit, in der die Königsmacht in Frankreich immer mehr erstarkte. Die Bourgeoisie begnügte sich zeitweilig damit, daß die Krone die Eigenmächtigkeiten der Feudalherren zügelte. Darüber hinaus wollte sie dem König einige Rechte und Privilegien abringen. Ein kleines Häuflein von reichen Kaufleuten und Wucherern suchte mit dem Hof profitable Geschäfte zu machen. Aber die breiten Schichten der Unternehmer und Händler wurden immer unzufriedener. In der Mitte des 17. Jahrhunderts wollten sie gegen den Absolutismus angehen, aber sie taten es sehr verhalten. Dabei richtete man sich nicht gegen die Religion, sondern wollte lediglich den Einfluß der katholischen Kirche etwas einschränken. Die Krone unterdrückte das oppositionelle Auftreten der Bourgeoisie, wobei sie sich auf die Geistlichkeit stützte. Energische Verteidiger und Agenten der Königsmacht waren die Jesuiten. Sie dienten der Regierung, kämpften gegen die sich unter der Bourgeoisie ausbreitenden Häresien, beherrschten die Schulen und verteidigten mit allen Mitteln die mittelalterliche Scholastik. Der Kampf gegen die Scholastik war ein Teil des Kampfes der Bourgeoisie gegen den Absolutismus.

Descartes' Lehre förderte diesen Kampf, obwohl sich Descartes selbst an den gesellschaftlichen Auseinandersetzungen nicht beteiligen wollte. Er fürchtete die Kirche und die Jesuiten sogar im protestantischen Holland, wo er zwanzig Jahre seines Lebens verbrachte. Die Verurteilung Galileis machte auf Descartes gewaltigen Eindruck. Er vermied es fernerhin, von der Bewegung der Erde um die Sonne zu sprechen, da er die kirchlichen Dogmen zu verletzen fürchtete. Aber dennoch wurde der Cartesianismus in den Händen der Bourgeoisie zu einem Kampfmittel gegen die katholische Kirche, die Stütze der absoluten Monarchie.

In Holland stand der Cartesianismus ebenfalls im Mittelpunkt der gesellschaftlichen Auseinandersetzungen. Hier hatte die Wissenschaft nach der Niederländischen Revolution (1572—1609) etwas mehr Unabhängigkeit von der Kirche erlangt. Holland war zu jener Zeit ein verhältnismäßig fortschrittliches Land. Nachdem die Handelswege über den Atlantischen Ozean führten und der Seehandel seine Hauptrichtung vom Osten nach dem Westen verlagert hatte, zogen anfangs die Holländer daraus den größten Nutzen. In Holland entstanden Manufakturen, und ihre Erzeugnisse fanden Absatz in ganz Europa. Nachdem durch die Niederländische Revolution der nördliche Teil des Landes von den Spaniern und der katholischen Geistlichkeit befreit worden war, entwickelte sich die Industrie schnell. Dies verlieh der Wissenschaftsentwicklung große Impulse. Als aber Mitte des 17. Jahrhunderts die endgültige Unabhängigkeit vom Katholizismus und von den Spaniern erlangt wurde, begann die holländische Bourgeoisie das eigene Volk zu fürchten. Hollands Volksmassen waren ärmer und wurden mehr unterdrückt als die Volksmassen im übrigen Europa. Aufstände der Armen erschütterten das Land, und die Verteidigung der Religion wurde immer mehr zu einer wichtigen Aufgabe der herrschenden Klassen.

Die protestantische Geistlichkeit kanonisierte ähnlich wie der Katholizismus den scholastisch verstandenen Aristoteles. Gegen Descartes gewandt, schrieb der Utrechter Pastor Gisbertus Voetius: Eine Philosophie, die die substantiellen Formen der Dinge und ihre spezifischen Eigenschaften ablehne, leugne folglich

die spezifische Natur der Dinge. Sie könne weder mit der physica sacra noch mit allem, was die Heilige Schrift lehrt, übereinstimmen. Diese Philosophie sei gefährlich, sie sei ein guter Boden für den Skeptizismus und fähig, den Glauben an die vernünftigen Seelen, an die Entstehung der Personen der heiligen Trinität, an die Verkörperung Jesu Christi, an die Erbsünde, das Wunder, die Propheten, die Gnade der menschlichen Wiedergeburt und die Realität von Dämonen zu zerstören.

Descartes' Physik erfuhr in seiner Arbeit „Le monde ou traité de la lumière" (1622—1632) ihre erste Darlegung. In dieser Schrift findet sich noch nicht jene Furcht vor den Theologen, die später, nach der Verurteilung Galileis, wenn nicht dem Denken, so doch mindestens der Sprache des Philosophen Descartes innewohnte. Gerade deshalb wurde die Veröffentlichung dieser Schrift lange zurückgehalten. „Le monde ou traité de la lumière" erschien erst 1664 postum.

Um Verfolgungen durch die Kirche zu entgehen, legte Descartes von vornherein seine Arbeit als utopischen Roman über eine imaginäre Welt an. Als aber das Werk fertiggestellt war, erfuhr er vom Prozeß Galileis und nahm deshalb von einer Veröffentlichung seines „Le monde ou traité de la lumière" Abstand. Er entschloß sich vielmehr dazu, seine physikalischen Auffassungen noch vorsichtiger zu formulieren. Die cartesische Lehre stand dennoch sehr bald im Mittelpunkt der gesellschaftlichen Auseinandersetzungen. Die ideologischen Bedürfnisse der französischen Bourgeoisie erforderten eine umfassende antischolastische, gegen die jesuitische Lehre gerichtete Plattform. Die progressiven gesellschaftlichen Kräfte fanden sie in Descartes' Physik vor. Wenn wir heute Descartes' Werke studieren, so finden wir in ihnen eine entschiedene Ablehnung traditioneller Auffassungen und ein konsequentes Streben nach einer Erklärung der ganzen Natur aus rein mechanischen Ursachen. Die „verborgenen Eigenschaften" der scholastischen Philosophie sind Hauptgegenstand der Angriffe Descartes'. Seine Gesinnungsgenossen Antoine Arnauld und Pierre Nicole, hervorragende Jansenisten und Kämpfer gegen die Jesuiten, führten in ihrer „Logik oder Kunst des Denkens" den Kampf gegen die verborgenen Eigenschaften noch schärfer und spitzten ihn dabei polemisch zu. Sie schrieben: „Wir ziehen es vor, der Erklärung der Dinge unterliegende Ursachen auszudenken anstatt anzuerkennen, daß uns ihre Ursachen nicht bekannt sind. Die Art und Weise, mit deren Hilfe wir uns dieser Anerkennung entziehen, ist dabei höchst vergnüglich. Wenn wir eine Wirkung sehen, deren Ursache wir nicht kennen, so bilden wir uns ein, wir hätten sie entdeckt. Wir fügen nämlich dieser Wirkung den Allgemeinbegriff Kraft oder Fähigkeit bei, der in unserem Verstand keine andere Idee bildet, außer der, daß diese Wirkung eine gewisse Ursache hat, was uns auch bekannt war, bevor wir zu diesem Begriff Zuflucht nahmen. So weiß beispielsweise jeder, daß unsere Arterien pulsieren, daß sich in der Nähe eines Magneten befindliches Eisen mit diesem vereinigt, und daß ... Opium einschläfert. Wer kein professioneller Gelehrter ist und sich seiner Unwissenheit nicht schämt, wird unverhohlen anerkennen, daß ihm diese Erscheinungen zwar bekannt, ihre Ursachen jedoch unbegreiflich sind. Die Gelehrten können hingegen nicht ohne Schamröte so sprechen. Sie suchen auf andere Weise einen Ausweg zu finden. Sie erheben den Anspruch, die wirklichen

Ursachen dieser Erscheinungen entdeckt zu haben. So ziehen sie den kühnen Schluß, den Arterien sei eine Pulsierungskraft eigen, dem Magnet wohne eine magnetische Kraft ... und dem Opium eine einschläfernde Kraft inne. Dies ist höchst bequem und jeder Chinese vermag mit gleicher Leichtigkeit das Erstaunen zu überwinden, welches in seiner Heimat aus Europa eingeführte Uhren hervorrufen. Er muß lediglich erklären, daß er das, was andere so erstaunlich finden, vollständig weiß, daß nämlich die Uhren eine *Zeige*kraft besitzen, die die Stunden auf dem Zifferblatt bezeichnet, daß sie weiter eine *Ton*kraft besitzen, welche das Schlagen der Uhren hervorruft. Auf diese Weise würde der betreffende Chinese eine gleiche Gelehrsamkeit hinsichtlich der Erkenntnis der Uhren gewinnen, wie sie Philosophen hinsichtlich des Pulsierens der Arterien, der Magneteigenschaften ... und des Opiums besitzen."[1]

Hieraus entnahm Molière die Motive für seine Satire gegen die Vertreter des scholastischen Denkens.

Das antidogmatische oppositionelle Denken der Jansenisten des 17. Jahrhunderts lieferte Descartes Argumente gegen die „verborgenen Eigenschaften" der Scholastiker. Aber die Argumentation des Cartesianismus war insgesamt umfassender. Wenn die ganze Natur durch das Wirken mechanischer Ursachen erklärt werden kann, so bleibt Gott nur eine geringe Rolle: er schafft lediglich die Materie und setzt sie in Bewegung.

Pascal schrieb: „Ich vermag Descartes Folgendes nicht zu verzeihen: in der ganzen Philosophie hätte er gut ohne Gott auszukommen vermocht. Aber er konnte sich nicht enthalten, ihm einen Nasenstüber zu verleihen, der ihn veranlaßt, die Welt in Bewegung zu setzen. Danach hat sie mit Gott gar nichts mehr zu schaffen."[2] Deshalb wandten sich nicht nur die Vertreter der katholischen Kirche, sondern auch die Deisten gegen den Cartesianismus (so zum Beispiel Voltaire).

In seiner Physik sprach Descartes von der Materie und nur von ihr. Er eliminierte aus der materiellen Welt konsequent alles, außer der Ausdehnung und identifizierte die Materie mit dem Raum. Der Körper ist nach Descartes eine ausgedehnte Substanz, Körper und Raum sind identisch. Der Körper ist ein begrenzter Teil des Raumes — ein räumlicher Bereich. In Descartes' Physik gibt es nichts außer Maßen, Formen, Lage und Bewegung der Körper. Die Natur der Materie besteht in der dreidimensionalen Ausdehnung. Die übrigen Eigenschaften der Körper können ihnen abgesprochen werden, ohne daß sie dadurch ihre Existenz verlieren. Descartes sprach speziell davon, daß die Schwere als Eigenschaft der Körper beseitigt wird, wenn sich diese Körper mit gleicher Geschwindigkeit bewegen wie die sie ergreifenden Hände. In ähnlicher Weise können den Körpern auch die übrigen Eigenschaften entzogen werden.

Descartes bewies, daß die Reduktion des Wesens des Stoffes auf die Ausdehnung der Verdünnung oder Verdichtung des Stoffes nicht widerspricht. Diese Prozesse sind lediglich Veränderungen der Körperform. In den ausgedehnten Stoffen existieren zwischen den Teilchen Poren, Zwischenräume, die mit anderen

[1] A. Arnauld/P. Nicole, La logique ou l'art de penser, Paris 1664, ch. XIX, § 3.
[2] B. Pascal, Pensées, I., Paris 1852, S. 41.

Körpern gefüllt sind. Wenn die Teilchen sich einander annähern, verringern sie die Porengröße, aber der Körper selbst verändert dabei nicht seinen Umfang, seine Ausdehnung. „Sehen wir zum Beispiel einen von Wasser oder einer anderen Flüssigkeit aufgeblähten Schwamm, so halten wir ihn in seinen einzelnen Teilen nicht für ausgedehnter, als wenn er zusammengedrückt und trocken ist, sondern nehmen nur an, daß seine Poren ausgedehnter sind und er deshalb auf einen größeren Raum sich erstreckt.“[3]

Descartes schlägt vor, von der Vorstellung eines beliebigen Körpers alles zu verwerfen, was nicht zu seiner Natur gehört. Vor allem ist die Festigkeit zu verwerfen, weil sich Körper ausdehnen und zusammenziehen können. Weiter ist die Farbe zu verwerfen, weil durchsichtige Körper vorstellbar sind. Die Schwere fällt ebenfalls unter die sekundären Eigenschaften, denn Descartes glaubt, daß das Feuer keine Schwere besitze. Die Temperatur des Körpers wird vernachlässigt, denn Hitze und Kälte sind durchaus nicht erforderlich dafür, daß der Körper sein reales Sein erhält. Die wahre Vorstellung des Körpers ist „... die Ausdehnung in die Länge, Breite und Tiefe, welche ebenso in der Vorstellung des Raumes ist, mag er nun von einem Körper erfüllt oder leer sein“[4].

Die Undurchdringlichkeit unterscheidet Raum und Materie keineswegs. Sie fällt vielmehr mit der Unzerstörbarkeit des Raumes selbst zusammen. Descartes verweist auf die Unmöglichkeit, zwei Raumteile zu vereinigen. Hieraus ergibt sich nach seiner Meinung das reale und materielle Sein des Raumes. Descartes' Opponenten hielten die Undurchdringlichkeit für ein Merkmal der Materie, das sie von der Leere, vom nicht mit Materie angefüllten Raum unterscheidet. Für Descartes besitzt die reine Ausdehnung dieselben Eigenschaften. Deshalb spricht er von ihrer Materialität.

Diese quantitative Kennzeichnung des Raumes dient in der cartesischen Physik nicht nur als Grundlage für den Begriff der Undurchdringlichkeit der Materie, sondern ist auch mit ihm identisch.[5]

Descartes wendet sich gegen die Vorstellung vom Raum als einem leeren mit Gegenständen gefüllten Gefäß. Er will zeigen, daß das Gefäß nur im gewissen Sinne als leer zu bezeichnen ist. Im gewöhnlichen Wortgebrauch versteht man unter Leere durchaus nicht die absolute Leere. Man hält einen Wasserbehälter für leer, wenn er kein Wasser enthält. Ein Fischbehälter wird für leer angesehen, wenn er zwar Wasser, aber keine Fische enthält. Ein Schiff sehen wir für leer an, wenn es lediglich mit Ballast gefüllt ist. Einen Raum bezeichnen wir nun nach Descartes als leer, wenn er keine wahrnehmbaren Gegenstände enthält. Dabei kann die materielle Substanz den Raum erfüllen, ohne auf unsere Sinnesorgane einzuwirken. Deshalb darf man nicht glauben, in einem Raum, der nicht auf unsere Sinnesorgane einwirkt, wäre tatsächlich nichts.

Descartes betrachtet als Beispiel ein Gefäß. Wäre es absolut leer, würde zwischen seinen Wänden kein materieller Körper sein, so würde zwischen ihnen überhaupt nichts existieren, was sie miteinander verbindet.

[3] R. Descartes, Die Prinzipien der Philosophie, Berlin 1965, S. 34.

[4] Ebenda, S. 36.

[5] Vgl. Cours de philosophie selon les principes de M. Descartes, v. 1, Amsterdam 1861, p. 291.

In der cartesischen Physik ergibt sich aus der Identität von Raum und Materie die unendliche Teilbarkeit der Materie. Die Existenz unteilbarer Atome ist ausgeschlossen.

Aus der Identität von Raum und Materie wird auf die extensive Unendlichkeit der Welt geschlossen. Des weiteren ergibt sich aus Descartes' Grundvoraussetzung die Gleichheit aller Materie. „Hieraus kann man auch leicht abnehmen, daß die Materie des Himmels keine andere als die der Erde ist und daß, wenn es unzählige Welten gäbe, sie doch alle aus ein und derselben Materie bestehen müßten, und daß es deshalb nicht mehrere, sondern nur *eine* Welt geben kann. Denn wir sehen klar ein, daß die Materie, deren Natur nur darin besteht, eine ausgedehnte Substanz zu sein, durchaus alle möglichen Räume ausfüllen muß, in welchen jene anderen Welten sein müßten, und wir finden keine Idee irgendeiner anderen Materie in uns."[6]

Die Identifizierung von Raum und Materie zieht sich durch die ganze cartesische Physik. Descartes meint, die wechselseitige Verschiebung der Körper, die Bewegung sei die Ursache aller Erscheinungen. Dabei erschöpft sich der Kausalzusammenhang in der Wechselwirkung der verschiedenen Raumteile, der physischen Körper. Descartes ist bemüht, die Universalität seiner Naturerklärung zu beweisen. Er türmt dabei eine Hypothese auf die andere und betrachtet schließlich die ganze Natur als aus den räumlichen Ausgangsbestimmungen logisch entwickelt. Einer der letzten Paragraphen der „Prinzipien der Philosophie" trägt die charakteristische Überschrift: „Kein einziges Naturphänomen ist in der Abhandlung unberücksichtigt geblieben."[7] Nach Descartes führt die geometrische Methode der Naturuntersuchung mit rein räumlichen Begriffen keineswegs zu willkürlichen Hypothesen; sie gibt vielmehr absolute und bestimmte, einzig mögliche Antworten auf beliebige Fragen der Wissenschaft. Descartes stellte sich aber durchaus nicht die Aufgabe, wirklich auf jede Spezialfrage der Wissenschaft einzugehen. Im dritten Teil seiner „Prinzipien der Philosophie" sagt er, daß die Bewegung der Materieteilchen, die den Naturerscheinungen zugrunde liegt, unterschiedlich sein kann: „Wir können deshalb jede beliebige annehmen, vorausgesetzt, daß alles daraus Abgeleitete voll und ganz mit der Erfahrung übereinstimmt."[8]

Die mit der Erfahrung übereinstimmende Ursache der Erscheinungen kann nur in der Körperbewegung bestehen. Dies ist nach Descartes' Meinung keine Hypothese, sondern eine unanfechtbare Wahrheit, die allein die Wissenschaft in ihrer Gesamtheit zu beweisen vermag. Der Beweis operiert mit speziellen *hypothetischen* Behauptungen. Descartes will zeigen, daß man bei Annahme einer ausgedehnten Substanz, die der kinetischen Kausalität unterliegt, aus ihr alle Naturerscheinungen ableiten kann, ohne akinetische Begriffe benutzen zu müssen. In seiner „Untersuchung über das Licht" finden wir das Kapitel „Beschreibung der neuen Welt und der Eigenschaften der Materie, aus der sie zusammengesetzt ist". Zu

[6] R. Descartes, Die Prinzipien der Philosophie, a. a. O., S. 41.
[7] Ebenda, S. 273.
[8] Ebenda, S. 82.

Beginn dieses Kapitels wird gesagt: „Wir wollen für einige Zeit von dieser Welt absehen, um eine neue zu betrachten, welche ich gleichzeitig mit dieser in imaginären Räumen betrachten will. Die Philosophen sagen, diese Räume seien unendlich. Natürlich kann man dem zustimmen, weil sie sie ja auch geschaffen haben. Damit uns aber diese Unendlichkeit nicht stört und uns nicht völlig in Anspruch nimmt, werden wir nicht bis zum Ende gehen; wir gehen nur so weit, um nicht all das aus der Sicht zu verlieren, was von Gott vor fünf- oder sechstausend Jahren geschaffen worden ist. Wenn wir uns so auf einem bestimmten Platz befinden, nehmen wir an, daß Gott um uns soviel Materie geschaffen hat, daß alles von dieser Materie erfüllt ist, wohin wir auch unseren Blick wenden."[9]

Weiter werden aus der Existenz der mit dem Raum identischen Materie die Entstehung der Teilchen, der Elemente, der Himmelskörper, der physikalisch-chemischen Prozesse, der Organismen, die kompliziertesten Verbindungen der sich bewegenden Teilchen verschiedenster Art abgeleitet. Descartes entwickelt die komplizierten Verbindungen, ohne sich daran zu stoßen, daß Tatsachen als Grundlage eindeutiger Konstruktionen fehlen. Er nimmt zu willkürlichen Hypothesen Zuflucht. Für Wissenschaftler der folgenden Generation wird der Wert einer Hypothese durch den Grad ihrer Allgemeinheit, durch die Menge der Naturerscheinungen bestimmt, die durch ein und dieselbe Hypothese erklärbar werden. Darin bestand das Kriterium der „Eleganz", das seit dem Ende des 17. Jahrhunderts in der wissenschaftlichen Literatur eine wesentliche Rolle zu spielen begann. Für Descartes besteht hingegen der Wert einer Hypothese in etwas anderem. Eine Hypothese muß eine mechanische Erklärung für eine beliebige physikalische, chemische oder physiologische Erscheinung geben. Dabei ist es durchaus möglich, daß eine Hypothese ad hoc geschaffen wird und nur die jeweils vorliegende Erscheinung erklärt. Man kann so eine Hypothese auf die andere aufbauen. Die Forderung der Allgemeinheit erweist sich dabei nicht als entscheidend. Allgemein und universal ist lediglich die Grundvoraussetzung der Physik Descartes' — die Identität von Stoff und Raum. Je komplizierter und *qualitätsreicher* ein physikalischer Prozeß ist, desto größeres Verdienst ist der Hypothese beizumessen, die ihn rein kinetisch erklärt. Deshalb hielt Descartes seine Erklärung des Geschmacks des Salzes durch die spitze nadelähnliche Form seiner Teilchen für einen besonderen Erfolg. Die Willkür dieser Erklärung störte Descartes und seine Anhänger nicht im geringsten. Die Cartesianer kümmerten sich gar nicht um die Eindeutigkeit einer speziellen physikalischen Theorie. Wichtig war es, die prinzipielle Möglichkeit einer universalen mechanischen Naturerklärung zu erweisen, in der es nichts als sich bewegende Materie gibt. Die physikalische Welt war aus der ausgedehnten Substanz errichtet. Spezielle Theorien konnten verschieden sein, wenn sie nur innerhalb der kinetischen Erklärung der Erscheinungen blieben.

Descartes' wissenschaftliche Großtat hat keine Analogie: Er wiederholte die ganze Arbeit Gottes, ohne dabei auf Wunder zurückzugreifen. Er konstruierte

[9] R. Descartes, Traité de la lumière, in: Oeuvres de Descartes, Bd. XI, Paris 1909, S. 31 bis 32.

eine komplette Welt und zeigte dabei, daß die Mechanik die Naturerscheinungen gänzlich und vollständig zu erklären vermag. Descartes hatte weder die Zeit noch das Bedürfnis, seine Konstruktionen auf exakt bewiesene, eindeutige und einzig mögliche Bilder zu beschränken. Seine Physik ist ein sehr tendenziöser und belehrender Naturroman. Seine Spekulationen in Einzelfragen führen letztlich zur Wahrheit, zur richtigen Schlußfolgerung: zum allgemeinen Bild der sich bewegenden Materie als der universellen Ursache aller Naturerscheinungen. In der Vorrede zur zweiten Ausgabe von Newtons „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" urteilt Cotes über die Vertreter des Cartesianismus: „... so versinken sie in Träumereien, indem sie die wahre Einrichtung der Dinge vernachlässigen, welche man vergebens durch falsche Vermutungen abzuleiten suchen wird, da man sie kaum, selbst durch die sichersten Beobachtungen erforschen kann. Diejenigen, welche ihre Spekulationen auf Hypothesen begründen, werden, wenn sie hierauf aufs strengste nach mechanischen Gesetzen fortschreiten, eine Fabel, vielleicht eine elegante und schöne, jedoch nur eine Fabel aufbauen."[10]

Diese Einschätzung ist natürlich durch Cotes' Frontstellung gegen Descartes hervorgerufen und insgesamt ungerechtfertigt. Wenn es aber in der cartesischen Physik diese Bestimmung verdienende Elemente gibt, so sind sie nicht nur eine elegante, sondern auch eine zutiefst lehrreiche Fabel und gleichzeitig mit einem richtigen *allgemeinen* Schluß verbunden. Natürlich war ein solcher Schluß schon im 18. Jahrhundert unzureichend.

2. Descartes' Bewegungstheorie

In seiner „Untersuchung über das Licht" stellt Descartes die Vorstellung von der Bewegung als einer stetigen Verschiebung der traditionellen Auffassung der scholastischen Philosophie gegenüber: „Die Philosophen nehmen auch eine Vielzahl von Bewegungen an, die sich nach ihrer Meinung ohne Ortsveränderung vollziehen können. Sie nennen derartige Bewegungen motus ad formam, motus ad calorem, motus ad quantitatem ... und gebrauchen tausenderlei ähnliche Bezeichnungen. Von all diesen Bewegungen kenne ich nur eine, die bedeutend leichter als die Linien der Geometer zu verstehen ist. Diese Bewegung vollzieht sich in der Weise, daß die Körper von einem Ort zu einem anderen übergehen, nacheinander den ganzen Raum einnehmen, der sich zwischen diesen Orten befindet."[11]

Descartes faßt den Begriff der Bewegung gegenüber seiner Bestimmung im Mittelalter enger. In der Literatur des Mittelalters hatte der geniale Gedanke der altgriechischen Philosophen von der Einheit aller Veränderungsprozesse in der Natur scholastische Züge erhalten. Wollte man zu einem einheitlichen Weltbild gelangen, in dem die aus der einen Form in eine andere übergehende Bewegung

[10] Sir Isaac Newton's Mathematische Principien der Naturlehre, mit Bemerkungen und Erläuterungen hrsg. v. J. Ph. Wolfers, Berlin 1872, S. 4.

[11] R. Descartes, Traité de la lumière, a. a. O., S. 39–40.

Ursache aller Erscheinungen ist, so mußte zuvor die einfachste Form der Bewegung von den komplizierteren Formen getrennt werden.

In dem erwähnten Zitat begegnen wir dem sehr wichtigen Gedanken von der Kontinuität der Verschiebung, wonach „... die Körper von einem Ort zu einem anderen übergehen, indem sie nacheinander den ganzen Raum einnehmen, der sich zwischen diesen Orten befindet". Wenn wir von der Translokation als Ausgangseigenschaft der Körper sprechen und ihr zum Beispiel die aristotelische substantielle Bewegung (Entstehen und Vergehen) gegenüberstellen, so setzen wir voraus, daß ein Körper auf seinem Weg mit sich selbst identisch bleibt. Wir haben bei der ersten Bestimmung der Translokation als Grundlage aller Naturerscheinungen schon jene Grundvoraussetzungen der mechanischen Naturwissenschaft erwähnt, von denen sich die moderne Physik abkehrt (oder die sie als angenäherte Vorstellungen behandelt), was zu einer echten und radikalen Abkehr von der mechanischen Naturauffassung führt. Die Grundlage für diese Abkehr liegt darin, daß die Aporien des mechanischen Weltbildes so starr fixiert sind. Sie gewinnen schon in der cartesischen Physik eine ziemlich eindeutige Form. Descartes' Bewegungsauffassung ergibt sich aus der Identifizierung von Raum und Stoff und ist mit einer ebensolchen Identifizierung der schwierigsten Aporien der mechanischen Weltanschauung als Ganzes verbunden. Wenn ein Körper nur Ausdehnung besitzt, wie kann er dann individualisiert werden, wo liegen die objektiven Unterschiede in den Eigenschaften, die den Übergang von einem Körper zu einem anderen der Umgebung kennzeichnen? Wodurch unterscheidet sich der betreffende Körper von seiner Umwelt? Descartes antwortet auf diese Fragen, indem er die Bewegung zur Grundlage der Existenz eines jeden Körpers erklärt. Bewegung „im echten Sinne" ist die Bewegung von sich berührenden Körpern, die die Existenz der Körper, ihre Abhebung aus der unendlichen gleichförmigen, mit dem Raum identischen Materie garantieren.[12] Der Kern der Nuß unterscheidet sich von der Schale und existiert als solcher nur dann real, wenn er sich relativ zur Schale bewegt. Im anderen Falle verschwinden die Grenzen des Körpers.

Descartes gesteht neben dieser Bewegung „im echten Sinn" der Bewegung noch einen anderen Sinn zu. Bei Bewegung „im gewöhnlichen Sinn" geht ein Körper von einem Ort zu einem anderen über. Ein Schiff, das dem Flußverlauf folgt, ist „im echten Sinn" unbeweglich und bewegt sich im „gewöhnlichen Sinn" gegenüber der Küste. Die Bewegung im „gewöhnlichen Sinn" ist relativ: Sie hat in Hinsicht auf einen bestimmten Bezugskörper eine bestimmte Geschwindigkeit. Man kann von einem Bezugskörper zu einem anderen übergehen, indem man die Bewegung hinsichtlich eines Bezugskörpers mit der Bewegung des zweiten zusammenlegt. Bei der Bewegung „im echten Sinne" können wir entweder die benachbarten Körper oder den betreffenden Körper selbst als unbeweglich ansehen. Hinsichtlich der Individualisierung der Körper ist eine solche Gleichberechtigung zweier Systeme ganz akzeptabel. Für die Trennung eines Körpers von seiner Umwelt ist es ausreichend, daß ein Unterschied zwischen der Ge-

[12] R. Descartes, Die Prinzipien der Philosophie, a. a. O., S. 42.

schwindigkeit des Körpers und seiner Umgebung besteht, die sich auf beliebige Bezugskörper bezieht. Also ist die Geschwindigkeit des auf die Umgebung bezogenen Körpers oder, was dasselbe ist, der Unterschied in der Geschwindigkeit von Umwelt und Körper Existenzkriterium des Körpers. Die nach Descartes mit dem Raume identische Materie unterscheidet sich vom leeren Raum durch unterschiedliche Geschwindigkeiten bei verschiedenen Teilen der Materie oder des Raumes, die infolge dieser Unterscheidung physikalische Züge gewinnen.

Im cartesischen Weltbild gewinnt der Raum durch die Bewegung physikalische Merkmale, und die Geometrie wird in dem Maße „physikalisiert“, in dem die Physik in Geometrie umgewandelt wird. Wenn man den Raumteilchen Bewegung als Grundlage ihrer Individuation, als Eigenschaft, die den Raum teilt, zuschreibt, nämlich materielle Körper, so heißt das nicht nur den Stoff auf den Raum zu reduzieren, sondern darüber hinaus den Raum zu Stoff zu machen. In Descartes' Raum befinden sich die Örter — sie sind ebenfalls Körper — in Bewegung. Manchmal, wenn die Geschwindigkeiten übereinstimmen, verflechten sie sich in einem Körper, manchmal unterteilen sie sich in verschiedene Teile, der eine wird gegenüber dem anderen verschoben, und sie gewinnen daher eine individuelle physikalische Existenz.

Das Problem der Abgrenzung der Teile des Raumes, die einen Körper bilden, von ihrer Umgebung und die cartesische Lösung dieses Problems — die Erfassung der Raumteilchen mit ihren unterschiedlichen Geschwindigkeiten — zeigt eindeutig, daß Geometrisierung der Physik Schaffung der physikalischen Geometrie bedeutet. Wir erkennen, daß die genannte Lösung des Individuationsproblems den Begriff der Identität des physikalischen Objektes mit sich selbst in das Weltbild einführt. Der Raum mit seinen rein geometrischen Beziehungen zwischen Körpern, Figuren, Linien und Punkten wird in eine Welt sich bewegender physikalischer Körper mit raum-zeitlichen Beziehungen zwischen realen Ereignissen umgewandelt.

Die Geometrisierung der Physik und die Physikalisierung der Geometrie ist mit dem Übergang von der *Kongruenz* geometrischer Figuren zur *Identität* physikalischer Körper mit sich selbst verbunden. Eine geometrische Figur kann sich bei Vereinigung mit einer anderen Figur als mit ihr identisch erweisen, ein physikalischer Körper dagegen nur mit sich selbst identisch sein.

Der Sinn der cartesischen Physikalisierung des Raumes (will man diese Wortschöpfung vermeiden, so kann man auch „der Genesis der physikalischen Geometrie“ sagen) besteht darin, daß Descartes den Raumteilchen nicht Kongruenz, sondern die physikalische Eigenschaft der Undurchdringlichkeit zuschreibt und die Undurchdringlichkeit auf die Unmöglichkeit zurückführt, Raumvolumen zu vereinigen. Im cartesischen Weltbild ist jedes Raumvolumen mit sich selbst identisch, kann aber nicht mit anderen vereinigt werden. Gerade darin besteht die Undurchdringlichkeit des Stoffes.

Die Ersetzung des Kongruenzbegriffs durch den der Identität mit sich selbst verändert das Wesen der Geometrie. Der Kongruenzbegriff entspricht der Geometrie als abstrakter Theorie, die von den qualitativen Eigenschaften der Körper abstrahiert und ihre idealisierten räumlichen Eigenschaften untersucht. Nun

haben aber bei Descartes die physikalischen Körper außer den räumlichen keine anderen Eigenschaften. Die Geometrie ist für ihn nicht die Wissenschaft von den abstrakt ausgewählten Eigenschaften physikalischer Körper, sondern die Wissenschaft von diesen Körpern selbst. Dieser Standpunkt war auch der historische Prototyp der physikalischen Geometrie.

Die Einengung des Bewegungsbegriffs ermöglichte es Descartes (buchstäblich „mit Mühe und Not"), das kirchliche Verbot der Kopernikanischen Lehre zu umgehen. In den „Prinzipien der Philosophie" entwickelt er folgende Auffassungen. Vom Standpunkt einer wirklich philosophischen Bewegungskonzeption ist die Erde *unbeweglich*, da sie sich gegenüber dem sie unmittelbar umgebenden Äther, dessen Wirbel die Erde nach sich zieht, nicht verschiebt. Gleichzeitig *dreht sich* die Erde mit diesem Äther um die Sonne. Hieraus folgt, daß das kopernikanische System, wonach sich die Erde um die Sonne bewegt, dem kirchlichen Dogma von der Unbeweglichkeit der Erde nicht widerspricht. Vom Standpunkt der wahren Bewegung aus gesehen ist es überhaupt unmöglich, von einer relativen Bewegung der Himmelskörper zu sprechen. Descartes opfert seine strenge Bewegungsauffassung auf dem Altar der kirchlichen Dogmen. Im Gegensatz dazu behandelt er die Planetenbewegung im gewöhnlichen Sinne in Übereinstimmung mit Kopernikus. Natürlich meinte das Dogma von der Unbeweglichkeit der Erde die absolute Unbeweglichkeit, die Descartes aber mit Lippenbekenntnissen umging. Vor seinen Freunden hat Descartes diesen Umstand nicht verborgen. Es werde deutlich, heißt es in einem seiner Briefe, daß er in Worten die Erdbewegung leugne, in Wirklichkeit aber am kopernikanischen System festhalte.

Natürlich ist das Wesen dieser Abgrenzung nicht in diesem einfachen „Kniff" zu sehen. Es ergibt sich vielmehr aus Grundthesen der cartesischen Physik.

Die Bewegung „im gewöhnlichen Sinn" kann sich auf unterschiedliche Bezugskörper beziehen. Wir können von einem Bezugssystem zu einem anderen übergehen, wenn wir die Bewegung der Körper im betreffenden System mit der Bewegung des Systems addieren. Somit wird es möglich, sich bei der Lösung mechanischer Aufgaben der Zusammensetzung und Zerlegung der Bewegung zu bedienen. Descartes gibt sogar eine gewisse Hierarchie von Bezugssystemen: „Obgleich *ein* Körper nur *eine* ihm eigene Bewegung hat, weil er nur von einzelnen bestimmten Körpern, die an ihn stoßen und ruhen, sich entfernt, so kann er doch an unendlich vielen anderen Bewegungen teilnehmen, wenn er nämlich einen Teil anderer Körper bildet, welche besondere Bewegungen haben. Wenn zum Beispiel jemand auf einem Schiffe mit einer Uhr in der Tasche wandert, so bewegen sich die Räder dieser Uhr nur mit der einen, ihnen eigentümlichen Bewegung; aber sie nehmen auch an einer anderen teil, sofern sie dem wandelnden Menschen folgen und mit ihm einen materiellen Teil bilden; wieder an einer anderen, sofern sie zu dem auf dem Meere sich bewegenden Schiffe gehören, und wieder an einer anderen, sofern sie zu dem Meere gehören, und endlich wieder an einer anderen, sofern sie zur Erde gehören, wenn nämlich die ganze Erde sich bewegt.

Alle diese Bewegungen sind in Wahrheit in diesen Uhrrädern; da man sie indes nicht leicht in so großer Anzahl zugleich vorstellen und insgesamt erken-

nen kann, so genügt es, nur *die* Bewegung an jedem Körper zu betrachten, welche ihm eigentümlich ist."[13]

Dementsprechend kann diese *eine* dem Körper eigene Bewegung für viele stehen. So unterscheiden wir an Wagenrädern zwei verschiedene Bewegungen, eine kreisförmige um die Achse und eine längs des zurückgelegten Weges.[14]

Descartes sieht eine derartige Bewegungsauffassung wohl für praktische Vorstellungen als nützlich an, nicht aber für die physikalische Analyse. Er sieht die Aufgabe einer solchen Analyse in einer Begründung der Individualität eines Körpers. Dafür ist eindeutig zu klären, ob sich der Körper gegenüber der übrigen Materie bewegt oder nicht.

Ist die Bewegung auf verschiedene, auch auf entferntere Gegenstände zu beziehen, so ergibt sich nach Descartes hieraus die völlige Relativität und Subjektivität der Bewegung. Man kann hinsichtlich eines jeden Gegenstandes sagen, daß er sich bewegt und nicht bewegt. „Wenn zum Beispiel ein Schiff auf dem Meer fährt, so bleibt der in der Kajüte Sitzende immer an derselben Stelle, wenn man nur die Schiffsteile beachtet, zwischen denen er seine Stelle bewahrt. Zugleich aber wechselt er stetig seinen Ort, wenn man die Küste beachtet, da er hier beständig sich von der einen entfernt und der anderen nähert."[15]

Wie ist nun eine eindeutige Antwort auf die Frage nach der Körperbewegung zu gewinnen? Die eindeutige, bestimmte Bewegung ist die Überführung von der Nachbarschaft der einen in die anderer Körper. Aber dieser Übergang ist keineswegs eine absolute Bewegung in dem Sinne, wie dieser Terminus in der Folgezeit angewandt wurde. Wir müssen die benachbarten Körper nur in Hinsicht auf das Gegebene als unbeweglich ansehen. Descartes spricht von der Wechselseitigkeit der Bewegung zweier Systeme, von denen das eine mit dem betreffenden Körper, das andere mit den benachbarten Körpern in Verbindung steht. Dies war in der historischen Entwicklung der Lehre von der Relativität der Bewegung ein wesentlicher Schritt nach vorn. Descartes versteht unter wahrer Bewegung die relative Bewegung sich berührender Körper, und damit befreit er sich von der völligen Unbestimmtheit, die mit dem durchgängigen Bezug der Bewegung auf verschiedene Körper verbunden ist. Es bleibt eine gewissermaßen doppelte Nichteindeutigkeit: mit dem gleichen Recht ist sowohl ein Körper als auch seine Umwelt als sich bewegend anzusehen. Mit diesem Vorbehalt erfüllte aber Descartes seine Aufgabe dennoch. Das Bild der relativen Bewegung eines gegebenen Körpers und der ihn umgebenden Körper erweist sich als eindeutig.

Die Wechselseitigkeit der Bewegung ermöglicht es Descartes, die relative Verbindung zweier Körper zur Grundlage ihrer Unterscheidung zu erklären. Descartes will weiterhin ein privilegiertes Bezugssystem einführen. Innerhalb der Mechanik irdischer Körper muß die Erde als unbeweglich angesehen werden, weil sie sich anderenfalls als nach verschiedenen Richtungen beweglich erweist. Auf der Erdoberfläche sich bewegende Körper können nicht Bezugskörper für die Erde selbst sein. Auf der Erde bewegen sich nach Descartes verschiedene Körper in unter-

[13] Ebenda, S. 45.
[14] Ebenda, S. 45f.
[15] Ebenda, S. 37.

schiedliche Richtungen. Wir wollen das an einem Beispiel verdeutlichen: Ein Körper bewegt sich westwärts. Scheinbar können wir mit gleichem Recht sagen, daß dieser Körper unbeweglich ist, während sich die Erde von ihm aus gesehen nach Osten bewegt. Wir müssen jedoch von einer solchen Vorstellung absehen, wenn wir einen anderen Bereich der Erde betrachten, wo sich ein anderer Körper in eine Richtung bewegt, die der des ersten Körpers entgegengesetzt ist, der sich also nach Osten bewegt. Nehmen wir nun diesen anderen Körper als unbeweglich an, so bewegt sich die Erde in bezug auf ihn in die entgegengesetzte Richtung, also nach Westen. Vom Standpunkt der Relativität der Bewegung aus ist also eine Vielzahl verschiedener Bewegungsrichtungen von Körpern auf der Erdoberfläche der gleichzeitigen Bewegung der Erde nach verschiedenen Richtungen äquivalent. Daher erklärt Descartes, daß man von einer Bewegung der Erde hinsichtlich der sich auf ihr befindlichen Gegenstände nicht sprechen kann. Man muß die Erde als unbeweglichen Bezugskörper ansehen.[16]

Wir kommen nunmehr zum Problem der Trägheit in Descartes' Physik. Die gegenseitige Verschiebung der Körper ist universell. Man kann sich beim Übergang zu einem gegebenen Bezugskörper den betreffenden Körper als ruhend vorstellen. Es ist aber unmöglich, daß die sich an den gegebenen Körper anschließenden und mit ihm berührenden Körper unbeweglich sind. Der betreffende Körper würde dadurch seine individuelle Existenz verlieren. Es kann nach der Ursache der Zustandsveränderung gefragt werden, nicht aber nach der der Zustandserhaltung. Descartes zählt die Bewegungsgesetze auf, „die drei Grundregeln, nach denen Gott die Gesetze dieser neuen Welt zu wirken zwingt", und schreibt: „Die erste Regel lautet: Jedes Materieteilchen befindet sich so lange in ein und demselben Zustand, bis der Zusammenstoß mit anderen Teilchen es zur Zustandsveränderung zwingt. Mit anderen Worten: Besitzt dieses Teilchen eine gewisse Größe, so wird es niemals kleiner, solange es nicht andere Teilchen teilen; ist ein Teilchen rund oder viereckig, so verändert es nicht diese Gestalt, solange es nicht zu einer anderen genötigt wird, befindet sich das Teilchen an einem bestimmten Ort so wird es sich so lange nicht von hier wegrühren, bis andere Teilchen es hinausstoßen. Hat sich aber das Teilchen zu bewegen begonnen, so wird es diese Bewegung beständig mit gleicher Kraft so lange fortsetzen, bis andere seine Bewegung zum Stillstand bringen oder verlangsamen."[17]

Somit sprengte die Trägheit den Zusammenhang mit dem Gedanken einer harmonischen Weltordnung und wurde zur Bestimmung eines Körpers, der keiner Einwirkung von außen unterliegt. Es war bereits unmöglich geworden, von einem Zentralkörper zu sprechen, um den sich die Inertialbewegung vollzieht. Die Drehungen im cartesischen Systen sind Wirbel, die durchaus nicht träge sind. Der Körper wird sich, da äußere Wirkungen ihn in die kreisförmige Wirbelbewegung einbeziehen, sich selbst überlassen, ohne Krümmung, d. h. geradlinig bewegen. Daher ist nach Descartes die Inertialbewegung ein negativer Begriff. Er besagt, daß ein nicht von der Umgebung beeinflußter Körper nicht in den

[16] Ebenda, S. 43–45.
[17] R. Descartes, Traité de la lumière, a. a. O., S. 38.

Wirbelkreis einbezogen wird und seinen Zustand der geradlinigen Bewegung oder der Ruhe beibehält. Hieraus ergibt sich nach Descartes, daß die Inertialbewegung keine mechanische Erklärung erfordert. Es ist die Veränderung der Geschwindigkeit, die eine solche Erklärung verlangt.

„Nehmen wir lediglich das Gesagte an, so weichen wir Schwierigkeiten aus, in welche die Gelehrten geraten, wenn sie dafür eine Begründung finden wollen, daß ein Stein noch eine gewisse Zeit seine Bewegung fortsetzt, nachdem er sich schon nicht mehr in den Händen des ihn Werfenden befindet. In diesem Fall kann man eher fragen, weshalb er seine Bewegung nicht ständig beibehält."[18]

Die mechanische Naturerklärung hat bei Descartes nicht die negative Trägheit zum Gegenstand, sondern die positive Wechselwirkung der Körper, die ihre Bahnen krümmt oder die Körper dazu zwingt, sich beschleunigt zu bewegen. Ist die reale Bewegung gekrümmt, so äußert sich die nicht realisierte Bewegung auf der Geraden nur in der Zentrifugalkraft. In diesem Falle fällt die Inertialbewegung mit der realen nur in einem Punkte zusammen. Der Körper bewegt sich unter dem Einfluß anderer Körper auf einer Kurve, aber in jedem Punkte strebt er danach, sich auf einer Tangente zu bewegen. Descartes verbindet die Inertialbewegung mit dem Begriff der Bewegung im jeweiligen Moment, mit der Geschwindigkeit im gegebenen Punkte: „... Wenn sich auch bei der Bewegung eines Körpers sein Weg sehr oft in Form einer Kreislinie vollzieht und wenngleich es, wie schon angeführt wurde, keine Bewegung gibt, die sich nicht in irgendeiner Weise kreisförmig vollziehen würde, so strebt nichtsdestoweniger jedes Teilchen im einzelnen danach, seine Bewegung geradlinig fortzusetzen. Und somit ist sein Wirken, das heißt seine Neigung zur Bewegung, von seiner Bewegung verschieden."[19] Die Zentrifugalkraft ist somit für Descartes ein Spezialfall der Trägheit.

Aus dem Begriff der geradlinigen Inertialbewegung entwickelt Descartes das Prinzip der größten Einfachheit der geraden Linie. „Von allen Bewegungen ist allein die geradlinige völlig einfach. Ihre Natur läßt sich sofort verstehen, denn es ist dafür die Voraussetzung ausreichend, daß sich ein beliebiger Körper in bestimmter Hinsicht im Zustand der Bewegung befindet, was in jedem der Momente der Fall zu sein pflegt, die im Verlauf der Zeit, wo sie sich bewegen, bestimmt werden können. Um die Kreisbewegung oder eine andere Bewegung darzustellen, muß man statt dessen wenigstens zwei solcher Momente, oder besser zwei seiner Teilchen sowie die zwischen beiden bestehende Beziehung betrachten."[20]

Für Galilei galt die krummlinige noch als vollkommenste, natürlichste und einfachste Form der Bewegung. Für Descartes ist die einfachste Bewegung die geradlinige, aber in der Natur existieren zusammengesetzte krummlinige oder beschleunigte Bewegungen. Die geradlinige und gleichförmige Inertialbewegung wurde bei Descartes zur Komponente einer zusammengesetzten realen Bewegung. Sie kann eine krummlinige Planetenbewegung, ein krummliniger Flug eines Wurfgeschosses, aber auch eine beschleunigte geradlinige Fallbewegung eines Körpers sein. In allen drei Fällen dient die Inertialbewegung als unveränder-

[18] Ebenda, S. 41.
[19] Ebenda, S. 43.
[20] Ebenda, S. 43–44.

liche Komponente der resultierenden Bewegung. Eine zweite Komponente ist die Bewegung des fallenden Körpers unter der Einwirkung der Schwere. Newton hat später die Ursache der Planetenbeschleunigung mit der Schwere identifiziert. Descartes ging nicht soweit, aber er schuf die Voraussetzung für den exakten Beweis dieser Identifizierung, indem er die Inertialbewegung als geradlinige Komponente der beschleunigten Bewegung faßte.

Descartes verwarf den Begriff des Vakuums, und daher verlor das Inertialgesetz seine Anschaulichkeit. Es ist danach unmöglich, sich die Körperbewegung als reales Experiment ohne die auf sie einwirkende Umwelt vorzustellen. Descartes spricht von sich beschleunigt bewegenden Körpern. Dir Trägheit figuriert dabei als Komponente der realen Bewegung.

Dieser Begriff wurde der Ausgangspunkt für die von Huygens geschaffene Theorie der Zentrifugalkräfte. In ihr wird aus der geradlinigen Inertialbewegung die Existenz einer Zentrifugalkraft abgeleitet, die dem Quadrat der Geschwindigkeit der Bewegung proportional und dem Kreisradius umgekehrt proportional ist.

Von erstrangiger Bedeutung war auch eine andere Seite der cartesischen Theorie der Bewegung — das Prinzip ihrer Unzerstörbarkeit. Descartes behauptete, daß die Menge der Bewegung nicht verändert werden kann. Diese These wird theologisch begründet. Aus der Vollkommenheit und Unveränderlichkeit Gottes ergibt sich die Konstanz aller Kräfte, denen die Natur unterworfen ist. Jeder Körper verharrt so lange im Zustand der Bewegung oder der Ruhe, bis ihn eine äußere Ursache verändert. Aus diesem Gesetz ergibt sich, daß ein sich selbst überlassener und sich bewegender Körper nicht nur seine Geschwindigkeit, sondern auch seine Bewegungsrichtung beibehält. Ein Körper, der sich auf einer gekrümmten Bahn bewegt, verändert ständig seine Richtung. Ein sich auf einer Geraden bewegender Körper behält seine Richtung bei.

Unter der theologischen Form der Bewegungsgesetze ist vor allem die Identifizierung der Inertialbewegung mit einem unveränderlichen Zustand zu verstehen. Descartes setzt die Bewegung (und die Ruhe als ihren Spezialfall) mit diesem Zustand gleich und leitet aus der Unveränderlichkeit des Zustandes die Erhaltung der Inertialbewegung ab. Der Körper erhält seinen Zustand, wenn er sich unbehindert bewegt. Somit kann die Bewegung nicht aufhören. Wenn der Körper auf einen Widerstand trifft, so kann die Bewegung weder vernichtet werden noch entstehen, sie geht vielmehr von einem Körper auf einen anderen über.

In seiner „Untersuchung über das Licht“ formuliert Descartes den Zusammenhang zwischen der Unveränderlichkeit des Zustandes und der Kontinuität der Bewegung im Weltall in folgender Weise: „... und nur daraus, daß Gott die Materie weiterhin im unveränderlichen Zustand behält, folgt notwendig, daß gewisse Veränderungen in ihren Teilen vorgehen müssen.“[21] Wir werden mit einem logischen Verfahren bekannt, mit dessen Hilfe Descartes die Möglichkeit schafft, ohne theologische Motivation zu den eigentlichen physikalischen Konstruktionen zu gelangen. Das Unveränderliche gehört in den Bereich Gottes. Die Physik befaßt sich mit den Zustandsänderungen, die von bestimmten Ursachen

[21] Ebenda, S. 37.

hervorgerufen werden: „Diese Veränderungen kann man, wie mir scheint, unmöglich unmittelbar dem Wirken Gottes zuschreiben, denn er ist völlig unveränderlich. Daher spreche ich sie der Natur zu. Die Regeln, nach denen sich diese Veränderungen vollziehen, nenne ich Naturgesetze."[22]

Somit schließt Descartes die Tatsache, daß sich die Natur bewegt und entwickelt, aus der Unveränderlichkeit des göttlichen Wirkens. Die Naturgesetze rufen hingegen die Veränderungen hervor. Das Erhaltungsgesetz hört auf, eine rein negative Feststellung der Unveränderlichkeit der Bewegungsmenge zu sein. Es wird in ein Bild des positiven Übergangs der Bewegung von einem Körper auf einen anderen verwandelt, wobei sich die Bewegung eines Körpers als Ursache für die Beschleunigung eines anderen erweist. In Descartes' *positiver* Darstellung der Naturgesetze lösen sich diese von den theologischen Begründungen. Sobald erst einmal die inerte Welt auf der Basis des Trägheitsprinzips geschaffen ist, in der die geradlinige und gleichförmige Bewegung eine unveränderte Geschwindigkeit beibehält (als Zeichen ihres göttlichen Ursprungs), betreten wir das Reich der kausalen Naturgesetze, die die Wechselwirkung der sich bewegenden Körper lenken. Hier bleibt für Gott, für metaphysische Begründungen und für reine Inertialbewegungen kein Platz mehr. In der wirklichen Welt erfolgt die Bewegung auf gekrümmten wirbelförmigen Bahnen, wobei diese keineswegs trägheitsfrei sind, wie bei Galilei, sondern durch die universelle Wechselwirkung verschiedener Elemente der alles erfüllenden Materie hervorgerufen werden.

Als empirische Grundlage seiner Bewegungsgesetze erarbeitete Descartes eine Theorie des Stoßes, die zum Teil auch willkürliche Behauptungen enthält.

Die Schaffung einer Stoßtheorie war für die Kinetik von großer Bedeutung. Wenn man gänzlich von der Fernwirkung absieht und die wissenschaftliche Forschung auf die Suche nach mechanischen Modellen reduziert, so muß man die wissenschaftliche Erklärung einer jeden Erscheinung auf Stöße zurückführen. Eine solche Reduzierung war tatsächlich das Ideal der mechanischen Naturerklärung. Noch Cuvier behauptet, der Stoß sei die einzige wissenschaftlich faßbare Form der Kausalität. Solange nicht alle Erscheinungen mit Hilfe von Stößen fester Körper erklärt sind, sei die physikalische Theorie weit davon entfernt, vollkommen zu sein. Haben wir einmal von der Erscheinung des Stoßes Abstand genommen, so haben wir keine klare Vorstellung von Ursache und Wirkung mehr. Alles zielt darauf, Einzelergebnisse zu sammeln und die allgemeinen, möglichst viele dieser Ergebnisse umfassenden Leitsätze zu suchen. Das sei das Prinzip aller physikalischen Theorien. Aber wie umfassend wir auch jede von ihnen ausbauen mögen — ihnen fehlt noch viel, wenn wir sie nicht auf die Gesetze des Stoßes zurückführen können. Denn diese allein, meint Cuvier, vermögen eine echte Erklärung der Erscheinungen zu vermitteln.

In Descartes' Stoßtheorie gewinnt das Inertialgesetz einen neuen Sinn. Die Körperbewegung wird als Ursache angesehen, welche die Beschleunigung eines anderen Körpers hervorruft, und folglich nicht mehr nur rein kinematisch betrachtet. Hier läßt sich das Inertialgesetz nicht mehr auf die negative Behauptung

[22] Ebenda.

reduzieren, daß ein Körper seinen Zustand beibehält, solange er keine äußere Einwirkung erfährt. Im Gegenteil — der Körper behält seine Geschwindigkeit auch in diesem Falle bei, und die neue Bewegung wird der Inertialbewegung (algebraisch) hinzugefügt.

Bei Descartes verwandelt der Zusammenstoß von Körpern eine geradlinige Bewegung durchaus nicht in eine krummlinige. Er verändert lediglich die Richtung der Bewegung. Aber eine große Zahl von Wechselwirkungen gibt immer eine geschlossene Bahnkurve, bildet einen Wirbel, weil sich ein Körper im gefüllten Raum nur bewegen kann, wenn ihm der vor ihm befindliche zweite Körper den Weg freigibt, indem er den dritten anstößt, usw., bis der letzte der vom Wirbel erfaßten Körper den Platz des ersten Körpers eingenommen hat. Die Wirbeltheorie steht mit der Hypothese von der absoluten Elastizität der Körper im Zusammenhang, auf deren Zusammenstoßen die Wechselwirkungen in der Natur zurückgeführt werden.

Die von Descartes entwickelte Stoßtheorie bezieht sich insgesamt auf absolut starre Körper. Descartes unterschied nicht exakt zwischen elastischen und unelastischen Körpern. Das war auch eine Ursache für die Mängel seiner Theorie. Alles ist abhängig von der Geometrisierung der Physik, von den Vorstellungen über die Form und die Ausmaße der Körper als Eigenschaften, die bei der Bewegung erhalten bleiben und die Identität des Körpers mit sich selbst garantieren. Alles ist abhängig von den Vorstellungen über die Bewegung als Grundlage der wirklichen physikalischen Existenz von Volumen und Form.

3. Die Lehre vom Stoff

In Descartes' dem Wesen nach geometrischer Materietheorie lassen sich alle Eigenschaften des Stoffes auf räumliche Konfigurationen der sich unterschiedlich bewegenden Teilchen der qualitätslosen Substanz reduzieren. Diese Teilchen sind keineswegs unteilbare Atome. Nach Descartes kann man jeden beliebigen diskreten Bereich der Materie als Teilchen bezeichnen, der sich gegenüber ihn umgebenden Körpern in Bewegung befindet. Für seine Lehre von der Masse, den Aggregatzuständen, von der Wärme und für seine Kosmologie waren allerdings Vorstellungen von bestimmten verhältnismäßig konstanten Teilchentypen erforderlich. Descartes bezeichnete sie als Elemente. In seiner „Untersuchung über das Licht" spricht Descartes von drei Elementen: vom Element des Feuers, des Himmels und der Erde. Das erste Element besteht aus Teilchen, die keine feste Form besitzen. Wir können die Form in dem Maße verändern, wie dies notwendig ist, um beliebige feinste Zwischenräume zwischen den Teilchen anderer Elemente auszufüllen. Die Teilchen zweiten Elements sind kugelförmig und können sich daher nicht so anordnen, daß keine Zwischenräume entstehen. Diese Zwischenräume werden von Teilchen ersten Elements ausgefüllt. Die Teilchen dritten Elements, des Elements der Erde, sind groß und bewegen sich mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit.

In einer gewöhnlichen Flamme können wir dem ersten Element niemals in reiner Form begegnen. Ebensowenig läßt sich die „rauhe" Luft auf das Luft-

element, d. h. auf das zweite Element zurückführen. Dessenungeachtet besitzt jedes Element im Weltall einen bestimmten Platz, wo es sich in seiner natürlichen Reinheit erhalten kann. Im Verlauf der Zeit differenzieren sich die Elemente. Darin besteht die Irreversibilität, die Gerichtetheit des Weltprozesses.

Diese Elemententheorie wird im wesentlichen in den „Prinzipien der Philosophie“ wiederholt. In den zwischen beiden Werken geschriebenen Arbeiten hat Descartes seine Elemententheorie allerdings etwas anders dargelegt. In Briefen aus der Periode, die der ersten Ausgabe der „Abhandlung über die Methode“ vorausgeht, und in Schriften, die dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden, sprach Descartes nur von zwei Elementen. Unter dem ersten Element wird hier das lichtübertragende Medium verstanden, das aus kugelförmigen Teilchen besteht. Descartes denkt dabei keineswegs an das Element, das in der „Untersuchung über das Licht“ zuerst genannt ist, also an eine sehr feine Materie, deren Teilchen keine feste Form besitzen. Dieses Element findet sich weder in den „Meteoren“ noch in der „Dioptrik“ noch in anderen Arbeiten Descartes’, die vor den „Prinzipien der Philosophie“ geschrieben wurden. Aber diese feinste Materie war zur Verteidigung der Grundthese der cartesischen Physik unbedingt notwendig. Gegen Descartes war eingewandt worden, daß zwischen den kugelförmigen Teilchen der feinen Materie leere Zwischenräume bleiben. In Erwiderung dieser Einwände beschränkte sich Descartes auf den unbestimmten Hinweis, daß noch feinere Elemente existieren.

Somit wurde die Hypothese einer sehr feinen Flüssigkeit, die aus Teilchen von unbestimmter Form besteht, bei Darlegung des Weltbildes als Ganzes erforderlich, damit sich in ihm keine leeren Räume ergaben. Deshalb wollte Descartes diesen Gedanken in einer philosophischen Abhandlung darlegen, welche die Weltanschauung als Ganzes erfaßt.

Die sehr feine Materie benötigte Descartes zur Begründung seiner Kosmogonie. In der „Untersuchung über das Licht“ geht er vom Urchaos aus. Die Stoffteilchen waren äußerst verschiedenartig. Diese Verschiedenheit mußte unausweichlich von der Differenzierung der Teilchen in drei Elemente abgelöst werden. In den „Prinzipien der Philosophie“ geht Descartes hingegen von der ursprünglichen Einheit der Teilchen aus und kommt letzten Endes auch zu seinen drei Elementen. Er behauptet in dieser Arbeit, daß die gesamte Materie ursprünglich nicht aus kugelförmigen Teilchen bestanden habe, weil Kugeln nicht den ganzen Raum kontinuierlich hätten ausfüllen können. Aber im Verlauf der Zeit sei eine große Zahl von Teilchen durch Abrundung zu Kugeln geworden. Die Zwischenräume zwischen den kugelförmigen Teilchen wurden mit „ganz kleinen Abgängen des Stoffes, welche die zur Ausfüllung nötige Gestalt hatten“ ausgefüllt.[23] Je kleiner die Abgänge der Teilchen sind, um so schneller bewegen sie sich und um so schneller können sie sich in noch kleinere teilen. Denn je kleiner sie sind, desto größer ist ihre Oberfläche im Verhältnis zur Masse. Die Einwirkung der übrigen Materie auf das Teilchen ist seiner Oberfläche proportional. Daher wächst diese Einwirkung mit der Verkleinerung der Teilchen, und entsprechend wachsen ihre zer-

[23] R. Descartes, Die Prinzipien der Philosophie, a. a. O., S. 84.

splitternden Kräfte. So entstehen die beiden ersten Elemente der Welt. Das erste Element zerspringt durch seine schnelle Bewegung bei der Begegnung mit anderen Körpern in Stückchen von unendlicher Kleinheit und füllt die kleinsten Zwischenräume zwischen den Teilchen zweiten Elements. Die andere Art der Materie ist in kugelförmige, und zwar im Vergleich mit den sichtbaren Körpern in sehr kleine Teilchen geteilt. Diese Teilchen haben aber doch eine feste und bestimmte Größe und sind in noch viel kleinere teilbar. Ein drittes Element wird später gebildet. Es besteht entweder aus größeren Stücken oder aus einer zur Bewegung schlecht geeigneten Form. Aus diesen drei Elementen besteht das Weltall.

Wir können nun zu Descartes' Auffassung von der Masse zurückkehren. Aus der Gleichsetzung von Raum und Materie ergibt sich, daß nicht die Masse, sondern nur das Volumen als Maß der Stoffmenge gilt. Descartes meint, es sei unmöglich, „daß in einem Gefäß mit Blei oder Gold oder einem anderen schweren und harten Körper mehr Materie oder körperliche Substanz enthalten sei, als wenn es nur Luft enthält oder für leer gilt"[24].

Descartes sah allerdings, daß das Gewicht des Körpers für die Mechanik von Bedeutung ist. Deshalb postulierte er, daß für die Bewegung nicht die allgemeine Menge der Bewegung im Körper, d. h. sein Volumen, wesentlich ist, sondern die Menge des wägbaren dritten Elements. Diese Menge entspricht im allgemeinen dem späteren Begriff der Masse. Descartes hielt die Masse nicht für eine allgemeine Eigenschaft der Körper. Darin besteht der grundlegende Unterschied zwischen der cartesischen Mechanik und der des 17. und 18. Jahrhunderts. Dieser Unterschied ist von erstrangiger historischer Bedeutung. Descartes verstand unter Trägheit und Undurchdringlichkeit rein geometrische Eigenschaften der Raum-Materie. Er vermochte daher nicht allen (makroskopischen) Körpern und Teilchen einheitliche mechanische Eigenschaften zuzuschreiben, die diese Körper vom leeren Raum unterscheiden. Dies geschah erst in den atomistischen Systemen des 18. Jahrhunderts.

Ist die Masse nicht der Stoffmenge proportional, sondern nur der Menge dritten Elements, so ist das Gewicht seinerseits dieser letzten Größe nicht proportional. Descartes leugnete somit den unzerstörbaren Zusammenhang zwischen dem Stoff und seinem Gewicht. Da Descartes ein Merkmal des Körpers nach dem anderen eliminiert, damit nur die Ausdehnung bleibt, entfernt er mit den übrigen Qualitäten auch das Gewicht. Er beruft sich dabei auf die Existenz gewichtsloser Körper. Auch die Schwere will Descartes entfernen, „denn nichts ist leichter als das Feuer, und doch gilt es für einen Körper"[25].

Die Vorstellung Descartes' von Masse und Gewicht ergibt sich aus seiner Theorie der Elemente. Wir wollen nunmehr untersuchen, wie aus dieser Theorie die Wärmelehre und der Unterschied der Aggregatzustände entwickelt werden.

Für Descartes gibt es nur einen Unterschied zwischen den Aggregatzuständen der Körper: die Körper können fest oder flüssig sein. Nach der cartesischen Lehre vom Stoff sind Gase von Flüssigkeiten nicht zu unterscheiden. In festen Körpern

[24] Ebenda, S. 40.
[25] Ebenda, S. 36.

sind die Teilchen unbeweglich, in flüssigen befinden sie sich in ständiger Bewegung. Für Descartes ist die Konfiguration ähnlich der Bewegung in den Begriff des Zustandes einbezogen und folglich ebenso konstant wie Bewegung. „... einmal in bestimmter Weise getrennt, verändern die Teilchen nicht mehr ihre Lage.“[26] Daher erfordert die Trennung ruhender Teilchen eine bedeutende Kraft. Daraus ergibt sich auch für Descartes die Unzerstörbarkeit fester Körper. Im Gegensatz dazu entwickeln die sich bewegenden Teilchen bei ihrer Trennung voneinander keinen solchen Widerstand.

Somit existiert für Descartes zwischen den festen und den flüssigen Körpern nur ein Unterschied: die Teile der festen Körper sind unbeweglich (im cartesischen Sinn, d. h. relativ zueinander) und ohne gewisse Anstrengung nicht zu trennen, die Teile der flüssigen Körper befinden sich in ständiger Bewegung und sind leicht trennbar. Entsprechend der unterschiedlichen Geschwindigkeit besteht ein allmählicher Übergang von völlig festen Körpern, in denen sich die Teilchen überhaupt nicht bewegen, bis zu den flüssigen Körpern, deren Geschwindigkeit außerordentlich groß ist.

Hieraus ergibt sich Descartes' Theorie vom Einfluß der Wärme auf die Struktur des Stoffes. Die Flamme ist eine Flüssigkeit mit besonders schneller Teilchenbewegung. Deshalb übt sie auf andere Körper Wirkungen aus, bringt die Teilchen dieser Körper in Bewegung, verwandelt sie in eine Flüssigkeit. Schmelzen und Verbrennen sind ihrem Wesen nach gleichartige Prozesse. In Metallen sind nach Auffassung Descartes' alle Teilchen gleichartig, und deshalb ruft die Flamme, die die einen Teilchen in Bewegung setzt, auch die Bewegung anderer Teilchen hervor. Das Metall wird geschmolzen. Andererseits unterscheiden sich die Teilchen des Holzes und anderer brennender Körper voneinander, und deshalb verwandelt die Flamme, die ganz großen Teilchen als unbeweglich zurücklassend, andere, kleine Teilchen in Flüssigkeiten, die sich von den großen trennen und zu Rauch werden.

Die Luft ist ebenfalls ein flüssiger Körper, wenngleich sie weniger flüssig als die Flamme ist. Descartes beschreibt die im Sonnenlicht sichtbar werdenden Stäubchen (er nennt sie Atome-atomes — und behauptet, daß die Schwingungen dieser Stäubchen die kontinuierliche Bewegung der Luftteilchen beweisen). Auch Luft und Flüssigkeit wirken auf die mit ihnen verbundenen Körper zerstörend. Allerdings ist diese Wirkung viel geringer als die des Feuers, weil die Bewegung der Teilchen hier unverhältnismäßig langsamer ist und andere Körper nicht in Flüssigkeit zu verwandeln vermag.

In der „Untersuchung über das Licht“ wird die Luft als Sammlung von Teilchen vorwiegend des zweiten Elements angesehen. In seinen „Meteoren“ behauptet Descartes, daß Wasserdampf aus Wasserteilchen besteht, die sich sehr schnell drehen. In den „Prinzipien der Philosophie“ werden in ähnlicher Weise alle Gase eingeschätzt, die in jener Zeit mit dem Begriff Luft bezeichnet wurden. Im vierten Teil der „Prinzipien der Philosophie“ wird die Luft als Anhäufung von Teilchen dritten Elements angesehen, die dünn und voneinander getrennt sind und deshalb Impulse vom zweiten Element empfangen, welches in die Zwischen-

[26] R. Descartes, Traité de la lumière, a. a. O.

räume zwischen diesen Teilchen eindringt. Jedes Teilchen rotiert in einem besonderen sphärischen Raum, in dem es keine weiteren Teilchen des dritten Elements gibt.

Die Temperatur der Gase entspricht nach Descartes der Geschwindigkeit der Teilchen. Diese Auffassung nähert sich im gewissen Maße heutigen Vorstellungen an und hatte wesentlichen Einfluß auf Theorien des 17. und 18. Jahrhunderts.

Die Identifizierung von Stoff und Raum führte Descartes zu einer sehr negativen Einschätzung der Atomistik. Er wandte sich gegen sie und verteidigte die unendliche Teilbarkeit des Stoffes, wobei er sie auf geometrische Teilbarkeit reduzierte.

Aus den Vorstellungen über den Stoff ergeben sich Descartes' kosmogonische Prinzipien. Aus den allgemeinen Bewegungsgesetzen leitet er spezielle und konkrete Naturgesetze ab. Er geht von den allgemeinen Bewegungsgesetzen zu komplizierten Gesetzen der Wechselwirkung der Körper beim Stoß über, zu Molekularprozessen, zu differenzierten Teilchentypen, deren Bewegung die kosmogonischen, physikalischen, chemischen und physiologischen Erscheinungen erklärt. Dies ist nicht nur eine *logische* Folge. Descartes nimmt eine Reihe von allmählich schwieriger werdenden Kategorien, welche vorher in ursprünglicher, unentwickelter Form bei Galilei anzutreffen waren und nach ihm von Newton in einer eindeutigen und exakten Kette von Schlußfolgerungen dargestellt wurden. Newton gelangt vom Gesetz der universellen Gravitation zu konkreten dynamischen Aufgaben. Auch Descartes kam von allgemeinen zu speziellen Prinzipien, aber sie waren nach seiner Auffassung, die sich mit der vieler Zeitgenossen deckte, in anschaulichen kinetischen Modellen verkörpert. So finden wir bei Descartes anstatt eines logischen Schlusses von „synchronen" Gleichungen eine historische Darlegung von einander abwechselnden kinetischen Bildern, die miteinander wie Ursache und Wirkung verbunden sind. Darin besteht die methodologische Grundlage der transformistischen Ideen Descartes'.

In seiner „Abhandlung über die Methode" schreibt Descartes: „Das Wesen dieser ganzen Welt aber ist viel leichter zu verstehen, wenn man sie so in ihrer allmählichen Entwicklung betrachtet, als wenn man sie als schlechthin gegeben und fertig ansieht."[27]

Man kann vermuten, daß Descartes' Transformismus ein didaktisches Verfahren ist, durch das die Natur der Stoffe leichter verständlich wird. So stellt es Descartes auch dar. In den „Prinzipien der Philosophie" zeigt er den Zusammenhang des transformistischen Standpunktes mit der kausalen Welterklärung noch deutlicher als in dem angeführten Zitat, aber er macht erneut den Vorbehalt, daß es um den bedingten didaktischen Charakter der kausalen Naturauffassungen geht.

Aber alle Vorbehalte über die Bedingtheit des kausal-transformistischen Studiums der Erscheinungen verlieren ihre Überzeugungskraft, wenn wir uns daran erinnern, daß sich nach Descartes' Auffassung die Natur der objektiven Welt und die Logik ihrer Erkenntnis nicht widersprechen können. Die Ausgangsglieder

[27] R. Descartes, Abhandlung über die Methode, Leipzig 1962, S. 53.

der logischen Analyse stimmen mit den Grundlagen, durch die die Wirklichkeit erklärt wird, überein. Die Wissenschaft muß die Ursachen erforschen und aus ihnen Folgerungen ableiten. Folglich besteht die Methode der Wissenschaft in der genetischen Erforschung der Erscheinungen, im Studium von Ursache und Wirkung in der Weise, wie sie in der Wirklichkeit aufeinander folgen — also historisch.

Wie sieht nun die Kette der mechanischen Ursachen und Wirkungen aus, die das Bild der Naturentwicklung prägen? Der Grundbegriff der cartesischen Kosmogonie ist der des Wirbels sich bewegender Materie. Aus der Identität von Materie und Raum, aus der absoluten Gefülltheit des Raumes folgt, daß jede Bewegung in sich zurücklaufen muß.

Descartes vertritt weiter die Auffassung, daß die in sich geschlossenen Bahnen der sich bewegenden Materie eine unregelmäßige Form haben können. Sie können sich verengen, und alle Schwankungen der Querschnitte werden durch ungleichmäßige Geschwindigkeiten kompensiert.

Als Beweis für die kreisförmige Bewegung dient folgende Beobachtung. Wenn man in ein geschlossenes Gefäß, etwa in ein Faß mit Wein, unten eine Öffnung macht, so fließt die Flüssigkeit nicht aus dem Gefäß. Die traditionelle Erklärungsweise beruft sich auf den horror vacui. Aber Descartes lehnt eine derartige Erklärung ab: „Dieser Wein hat bekanntlich keine Seele und hat nichts zu fürchten. Hätte er aber eine Seele, so könnte ich mir nicht vorstellen, in welcher Weise er von dieser Leere Kenntnis nehmen könnte, da er doch in Wirklichkeit nur eine Chimäre ist.“[28]

Descartes hält eher eine andere Erklärung für richtig: Der Wein fließt deshalb nicht aus dem Faß, weil es verschlossen ist und keine kreisförmige Bewegung entstehen kann. Die Luftteilchen, die dem ausfließenden Wein Platz machen müssen, können im Weltall keinen Platz finden, da es angefüllt ist. Die Teilchen aber, die in dem Faß anstelle des ausfließenden Weines Platz finden könnten, können diesen Platz nicht einnehmen, weil es im Faß keine anderen Öffnungen gibt.

Descartes legt seine Wirbeltheorie in der „Untersuchung über das Licht“ (Kap. VIII bis X) und im III. Teil seiner „Prinzipien der Philosophie“ ausführlich dar. Die Wirbel erklären vor allem die Entstehung des Weltalls mit den Sternen, der Sonne und den Planeten aus einem ursprünglichen Materiezustand. In welchem Zustand sich das Weltall ursprünglich auch immer befunden haben mag — es mußte sich in ihm nach Descartes im Laufe der Zeit ein Wirbel herausbilden. In der Welt gibt es kein Vakuum, und deshalb müssen sich alle Stoffteilchen im Kreise bewegen. Sie streben aber in verschiedene Richtungen, und deshalb ist die Bewegung des gesamten Weltalls um ein einziges Zentrum nicht vorstellbar. Im Gegenteil, aus einer beliebigen, völlig ungeordneten Bewegung bilden die Teilchen des Weltalls kreisförmige Wirbel um viele Zentren. In den dem Mittelpunkt der Kreisbahnen nahen Bereichen sammeln sich die am wenigsten beweglichen und kleinsten Teilchen.

Mit Konzentration der Teilchen um den Mittelpunkt werden sie auch sortiert: in den verschiedenen Abständen von den Zentren sammeln sich gleichartige Teilchen an.

[28] R. Descartes, Traité de la lumière, a. a. O.

Die kleinen Teilchen ersten Elements empfangen die Bewegung von größeren Teilchen zweiten Elements, vermögen ihnen aber ihre eigene Energie nicht in gleichem Maße zu vermitteln. Im ersten Element bleibt stets ein Vorrat an Bewegung vorhanden, und seine Teilchen befinden sich in ständiger Bewegung. Daraus folgt, daß die Übertragung der Energie nicht umkehrbar ist. Die Bewegung geht von den Teilchen zweiten Elements auf die des ersten über, und im Laufe der Zeit muß somit der Vorrat an Bewegung im ersten Element wieder anwachsen.

Die kleinen und schnellen Teilchen und Splitter werden allmählich immer größer, weil die kugelförmigen Teilchen zweiten Elements sich auch noch drehen, wenn es im Weltall genügend Splitter zur Ausfüllung der Zwischenräume gibt. Der Rest ersten Elements hat sich in einigen Zentren konzentriert, in denen flüssige kugelförmige Körper gebildet wurden. In einem solchen Zentrum bildete sich die Sonne heraus, in anderen entstanden die übrigen Fixsterne.

Außer dem ersten und zweiten Element gibt es im Weltall Teilchen des dritten, wenig beweglichen Elements. Aus ihnen bilden sich die Planeten und Kometen. Sie streben zum Zentrum des sie einschließenden Himmels, erreichen dieses Zentrum aber nicht, weil es von der Sonne oder, in anderen Himmeln, von einem Fixstern eingenommen wird. Die Planeten stehen in einem gewissen Abstand vom Zentrum, der dem Gleichgewicht zwischen der zum Bereich der Planeten gehörigen Kraft der Teilchenbewegung und der Kraft der Bewegung der umgebenden Himmelsmaterie entspricht. So entstehen die verschiedenen Planetenbahnen.

Wenn die Planeten ihren Ort erreicht haben, bewegen sie sich zusammen mit der sie umgebenden Himmelsmaterie. Es gibt aber nach Descartes zwischen der Bewegung der Himmelsmaterie und der der Planeten einen gewissen Unterschied, der letzten Endes zur Drehung der Planeten um ihre Achse führt. Die Teilchen des Himmels holen den Planeten dank der Ungleichheit ihrer Geschwindigkeit ein, stoßen an ihn an und weichen aus — jedoch nicht in Richtung auf das Zentrum des Wirbels, sondern auf seine Peripherie. Es bildet sich ein Strom von Himmelsmaterie, der den Planeten von der äußeren Seite des Wirbels her umspült. Dieser Strom zwingt den Planeten dazu, sich nicht nur um die Sonne, sondern auch um sich selbst zu drehen.

Nach der Geschichte des Sonnensystems behandelt Descartes die Geschichte der Erde.[29] Ursprünglich bestand die Erde, ähnlich der Sonne und den Fixsternen, aus Materie ersten Elements. Sie stand im Mittelpunkt eines sie umgebenden großen Wirbels. Da indes die gerieften Teilchen und die übrigen, und zwar nicht die allerkleinsten Stückchen dieser Materie ersten Elements aneinanderhingen und sich gegen die Materie dritten Elements wendeten, entstanden daraus zunächst dunkle Flecken auf der Oberfläche der Erde, wie wir solche an der Sonne entstehen und vergehen sehen. Dann bildeten die Teilchen dritten Elements, die bei dieser fortgehenden Auflösung der Flecken zurückblieben und sich im benachbarten Himmel verbreiteten, dort im Laufe der Zeit eine große Masse Luft oder Äther. Als schließlich dieser Äther sehr groß wurde, bildeten sich dich-

[29] R. Descartes, Die Prinzipien der Philosophie, a. a. O., S. 150ff.

tere Flecken um die Erde herum, und so wurde sie dann ganz bedeckt und verdunkelt. Als sich die Flecken nicht mehr auflösen konnten und viele übereinanderlagen und zugleich die Kraft des die Erde enthaltenden Wirbels abnahm, fiel sie schließlich mit den Flecken und der ganzen Luft, welche sie einschloß, in den größeren Wirbel, dessen Mittelpunkt die Sonne ist. Noch davor saugte der Wirbel der Erde den seiner Größe nach kleineren Wirbel des Mondes auf, und der Mond wurde zum Erdtrabanten. Die Erde erhielt übrigens auch ihren eigenen Wirbel, der bedeutend schwächer, aber noch ausreichend war, um den Mond anzuziehen und als Quelle für die irdische Schwerkraft zu dienen.

Die Erdstruktur ist das Ergebnis der beschriebenen Entwicklung. Im Erdzentrum befinden sich bis jetzt sich schnell bewegende Teilchen ersten Elements. Dieser Erdkern ist glühend und dem Sonnenstoff ähnlich. Er ist von einem festen Körper umgeben, der seinerseits von einer dritten Schicht umhüllt ist. Sie enthält die Metalle und andere Bestandteile der Erdrinde. Die genannten drei Schichten bildeten sich schon zu der Zeit heraus, da die Erde noch nicht vom Wirbel der Sonne aufgesaugt war. Die äußeren Erdschichten bildeten sich danach. In ihren Strukturen sehen wir die Ergebnisse der Bestrahlung der Erde durch die Sonnenstrahlen. Ursprünglich war die Erde von einer Wasserhülle umschlossen. Danach bildete sich über dem Wasser eine feste Rinde, die bis heute die Erdhülle ausmacht. Die Ströme ersten und zweiten Elements schlugen in diese Rinde unter dem Einfluß der Sonne Spalten und Rinnen. Diese füllten sich an manchen Orten mit Wasser, das zur Oberfläche drängte. So wurden die Flüsse und Meere gebildet. Ein Teil der Erdrinde, der sich senkte, füllte sich nicht mit Wasser, sondern bildete die Niederungen. Ein anderer Teil der Erdrinde faltete sich auf und bildete die Gebirgsrücken.

Wie wir sehen, ist die Kosmogonie Descartes' auf willkürliche Annahmen gegründet. Aber es wird auch deutlich, daß gerade der konsequent kinetische Charakter der cartesischen Physik zum Gedanken von der Entstehung des Weltalls geführt hat.

4. Der Äther

Die Elemente des Stoffs, die sich nach ihrer Struktur und ihren Bewegungen unterscheiden, ermöglichen es Descartes, ein Weltsystem zu konstruieren und seine Entwicklung zu beschreiben. Er stößt dabei auf ein Grundproblem des Weltalls und kommt zu einer entscheidenden Aporie der mechanischen Naturvorstellung. Sie besteht in folgendem: worin ist das ständige, unveränderliche Prädikat zu sehen, das es möglich macht, den Körper bei Veränderung seiner Stellung im Raum zu identifizieren, das dem Begriff der Stellung im Raum physikalischen Sinn verleiht und den Körper vom Raum unterscheidet? Descartes lehnt einen qualitativen Unterschied, der bei Aristoteles den Körper von seiner Umwelt abhebt, ebenso ab wie den Unterschied zwischen realem Sein und realem Nichtsein, der die Atome bei Demokrit aus dem umgebenden Raum heraushebt. Bei Aristoteles ist der Raum, gefüllt mit einem qualitativ von den sich bewegenden

Körpern verschiedenen kontinuierlichen Medium, physikalisch nicht homogen. Das ermöglichte es, den Begriff der räumlichen Lage der Körper und ihrer räumlichen („örtlichen") Bewegung anschaulich physikalisch (kinematisch!) zu interpretieren. Bei Descartes ist dagegen der Raum und ebenso der mit dem Raum identische Stoff homogen. In den dynamischen Konzeptionen des 17. Jahrhunderts sah man den Unterschied der Körper gegenüber der Umgebung, dem mit dem Stoff nicht identischen leeren Raum, in der trägen Masse als Grundeigenschaft des Körpers, die nicht auf kinematische Bestimmungen reduziert werden kann. Welches Prädikat benutzte nun Descartes, um die Individualität eines Körpers zu gewährleisten? Nur eine Eigenschaft des Körpers, seine Bewegung, unterscheidet sich hinsichtlich der Geschwindigkeit von der Umgebung und ist für alle Körperteilchen gleich. In diesem Falle wird die Umwelt zur Gesamtheit der Körper, die sich unterschiedlich bewegen und sich nach bestimmten gemeinsamen geometrischen Eigenschaften, nach Form und Größe, gruppieren, die nur einen Sinn haben: ihnen gegenüber verläuft in einem Volumen gegebener Form und Größe die Bewegung aller Teile mit gleicher Geschwindigkeit. Descartes muß eigentlich zwei Fragen beantworten: „Was ist ein Körper, wodurch unterscheidet er sich vom ihn umgebenden Raum?" und „Wie bewegt sich ein Körper?". Descartes beantwortet nur die zweite Frage und meint dadurch auch die erste beantwortet zu haben.

Dem Wesen nach gibt es für Descartes nur eine Begründung: Die Raumteilchen besitzen keine Kongruenz, sie sind undurchdringlich, und deshalb kann man nicht von einer konsequenten Vereinigung des Körpers mit der Umgebung, mit den verschiedenen Raumteilchen sprechen. Im gewissen Maße antizipiert Descartes das dynamische Kriterium der Individuation der Körper, das in ihrem Widerstand gegen den Impuls besteht. Aber hier geht es nicht um den dynamischen Effekt, sondern lediglich um den Raum, dessen Teile keine Kongruenz haben.

Hieraus ergibt sich, daß die dynamische Wechselwirkung der Körper in Stößen besteht, die durch Zwischenkörper übertragen werden. Diese Zwischenkörper sind in ihrer Form und Größe nicht unmittelbar zu beobachten. Die Verschiebungen der Zwischenkörper erklären nicht nur die dynamischen Wechselwirkungen, sondern auch den Schall, die Wärme und die Prozesse, die in dem den Körper umgebenden Medium ablaufen. Dazu gehört auch die Ausbreitung des Lichtes. Hier liegt die Quelle für einen cartesischen Gedanken, der drei Jahrhunderte lang in der Wissenschaft wirken sollte. Es handelt sich um die *Ätherhypothese*.

Die Äthertheorie ist in vielem Christian Huygens verpflichtet. Sie ist von ihm in Holland erarbeitet worden, wo auch Descartes lange gewirkt hat. In Holland vermochte Descartes sein philosophisches System ohne besondere Hindernisse aufzustellen. Die Angriffe der holländischen Theologen waren nicht mit der Aktivität der Inquisition zu vergleichen, das Los Baruch de Spinozas nicht mit dem Schicksal Giordano Brunos.

Diese Bedingungen werden nicht durch die protestantische Religion an sich erklärt. Entscheidend waren vielmehr der verhältnismäßig hohe ökonomische Entwicklungsstand und besonders die ökonomischen und politischen Ergebnisse des Unabhängigkeitskampfes der Niederländer. In Holland haben Descartes,

Bayle, Locke, Toland und Spinoza gewirkt. Sie stammten aus verschiedenen Ländern und fanden hier relative Freiheit für das wissenschaftliche Schaffen. In Holland wurden das Mikroskop und das Fernrohr erfunden. Höhepunkt der theoretischen, experimentellen und angewandten Naturwissenschaft waren die Arbeiten von Huygens, einem Mathematiker, der eine der ersten Darlegungen der Wahrscheinlichkeitstheorie lieferte, als Astronom die Saturnringe und einen Saturnbegleiter entdeckte, Uhren mit Pendel und eine Pulvermaschine erfand und, was das Wichtigste ist, die Wellentheorie des Lichtes und die Ätherlehre aufstellte.

In der Wissenschaft des 19. Jahrhunderts wurde der Theorie vom Äther, als von dem Medium, welches das Licht überträgt, grundlegende Bedeutung beigemessen. Wenn wir aber die Ätherhypothese historisch betrachten, uns der Ideen erinnern, die die Naturwissenschaft schließlich aufgegeben hat, weil sie zu ihrer Zeit nicht unmittelbar bestätigt wurden, nur von mittelbarem Einfluß auf die wissenschaftliche Entwicklung waren, so ist eine Reihe von Theorien über die Schwerkraft von großem historischem Interesse, die sich auf Äthervorstellungen gründeten. Sie wurden durch die Newtonsche Mechanik in den Hintergrund gedrängt. Die optische Funktion des Äthers trat in den Vordergrund. Aber letztlich hegten auch in den Jahren des größten Triumphes der Newtonschen Auffassungen Wissenschaftler die Hoffnung, eine kinetische Ursache für die Schwerkraft zu finden.

Wir wollen nun zu Descartes' Gravitationstheorie kommen. Zunächst muß darauf hingewiesen werden, daß Descartes einer der vielen Vorläufer Newtons war, die von einer Beziehung zwischen Entfernung und Schwerkraft sprachen. In einem Brief an Mersenne vom Juli 1638 beschrieb Descartes ein Experiment, das nach seiner Meinung die Abhängigkeit der Schwere von der Entfernung eines Körpers vom Erdzentrum bewies. Man müsse Gewichte an einen hohen Turm hängen, zu dessen Fuße sich ein tiefer Brunnen befindet, und das Gewicht der Last bestimmen, die auf der Waagschale mit dem Gewicht an einem langen Faden hängt, der von der Turmspitze in den Brunnen herabgelassen wird. Darauf muß man Last und Faden wiegen, indem man sie auf die Waagschale legt: „Da nun die Entfernung zwischen der Tiefe des Brunnens und der Turmhöhe in nicht geringem Maße mit dem Durchmesser der Erde im Verhältnis steht, und auch infolge anderer Überlegungen nehme ich an, daß dieses Experiment für das erwähnte Ziel nur dann dienen könnte, wenn der Unterschied im Körpergewicht auf verschiedenen Höhen sehr bedeutend wäre."[30]

Daher neigt Descartes dazu, sich auf abstrakte Beweise der Abhängigkeit der Schwere von der Entfernung zum Erdzentrum zu beschränken. Im gleichen Brief spricht er über Mond, Venus, Merkur, und über andere Planeten, die offensichtlich aus den gleichen Stoffen wie die Erde bestehen. Diese Planeten müßten auf die Erde fallen, wenn die bedeutende Entfernung ihre Schwere nicht aufheben würde. Es folgen weitere Hinweise auf Vögel, die weit von der Erde entfernt anscheinend mit größerer Leichtigkeit fliegen als in der Nähe der Erdober-

[30] R. Descartes Oeuvres, t. II, p. 267.

fläche, auf einen Drachen, der einen Teil seines Gewichtes beim Aufsteigen verliert, sowie auf Experimente mit einer in Richtung zum Zenit abgeschossenen Kugel, die scheinbar niemals zurückkommt. Über dieses Experiment hatte Mersenne schon zuvor an Descartes geschrieben. Descartes antwortete, man müsse dieses Experiment nicht mit einem Gewehr, sondern mit einer großen Kanone und mit einer eisernen Kugel machen, damit die Kugel nicht schmölze und dann leicht gefunden werden könnte. Descartes gab dem Brief sogar Zeichnungen von der Aufstellung der Kanone bei.

Aus all dem wird ersichtlich, daß Descartes keine konkreten Vorstellungen über eine quantitative Abhängigkeit zwischen Gewicht und Entfernung entwickelte. In dieser Hinsicht scheidet ihn eine ganze Epoche von Newton. Descartes' Gedankenexperimente und seine reichlich vagen Berufungen auf das Experiment sind noch weit von den Experimenten Newtons entfernt.

Zur Zeit Descartes' entwickelten einige Physiker eine Fernwirkungstheorie der Schwerkraft, allerdings in einer primitiven, mit dem Newtonschen System nicht vergleichbaren Form. Descartes wandte sich entschieden gegen derartige Theorien. Er sah die Ursache der Schwere im Druck der Himmelsmaterie auf die Körper. Diese aus Teilchen zweiten Elements bestehende Materie umgibt die Erde und dreht sich mit der Erde um ihre Achse. Sie übt eine Zentrifugalkraft aus, indem sie die Teilchen zweiten Elements von sich abstößt. Descartes beruft sich hier auf die absolute Gefülltheit des Raumes und behauptet, daß sich die Teilchen zweiten Elements nur unter der Bedingung von der Erde entfernen können, daß sich Körper gleichen Volumens der Erde nähern. Deshalb verlangt die Bewegung der Teilchen der Himmelsmaterie, die durch die Zentrifugalkraft von der Erde wegstreben, daß sich in der Atmosphäre Körper befinden, die sich der Erde nähern. Darin ist auch die Ursache der Schwere zu sehen. Descartes wollte seine Schwerkrafttheorie experimentell beweisen. Er setzte kleine Kügelchen mit verschiedener Dichte in ein Gefäß und brachte es zur Drehung. Dabei näherten sich die Bleikügelchen dem Gefäßrand, während die leichten Holzkügelchen in der Gefäßmitte blieben. Mit diesem Experiment illustrierte Descartes seine Hypothese von der Zentrifugalbewegung der Himmelsmaterie und der entgegengesetzten Zentripetalbewegung der sich in der Atmosphäre befindenden Körper. Er postulierte zur Erklärung der Frage, warum gerade schwere Körper zur Erde streben, die aus kleinen Teilchen bestehende Luft werde von der Himmelsmaterie an die Peripherie getragen, dichte Körper hingegen, wie zum Beispiel Steine, strebten, ihren Platz der Luft überlassend, zur Erde.

In der Gravitationstheorie finden sich viele willkürliche Annahmen, phantastische Bilder und unbegründete quantitative Bestimmungen, wie die vom Verschwinden der Schwere bei großen Entfernungen. Aber die cartesische Gravitationstheorie erfreute sich großer Sympathie. Sie verzichtete auf Fernwirkungen und verblieb gänzlich im Bereich der mechanischen Kausalität. Nur neue Fakten und die Übereinstimmung zwischen den Gesetzen der Newtonschen Mechanik und den Beobachtungen zwangen die Naturforscher, sich von der Wirbeltheorie zu trennen. D'Alembert schrieb über sie: „Wenn man jene heute fast lächerlich gewordenen Wirbel (tourbillons) unvoreingenommen beurteilt, wird man zu-

geben — ich wage es zu sagen —, daß man sich damals nichts Besseres ausdenken konnte. Die astronomischen Beobachtungen, welche später dazu gedient haben, diese zunichte zu machen, waren damals noch unvollkommen oder nicht hinreichend bestätigt. Nichts war natürlicher, als ein Fluidum anzunehmen, welches die Planeten mit sich fortreißt. Erst eine lange Reihe von Beobachtungen, Vernunftsbeschlüssen und Berechnungen und dementsprechend eine lange Reihe von Jahren konnten es dahinbringen, daß man auf diese so verführerische Theorie verzichtete. Sie hatte im übrigen den besonderen Vorzug, durch die Zentrifugalkraft des Wirbels selbst die Gravitation der Körper zu erklären, und ich behaupte unbedenklich, daß diese Erklärung der Schwere (pesanteur) eine der schönsten und geistvollsten Hypothesen ist, welche die Philosophie jemals ersonnen hat. Zu ihrer Aufgabe mußten daher die Physiker, sozusagen gegen ihren Willen, erst durch die Theorie der Zentralkräfte (forces centrales) und durch Experimente, die erst viel später gemacht wurden, bewogen werden.“[31]

Im 18. Jahrhundert, besonders in seiner ersten Hälfte, erklärten viele Physiker wie Descartes die Schwerkraft mit kinetischen Modellen. Huygens benutzte sehr gründlich Descartes' methodologische Prinzipien, nicht jedoch die Mehrzahl seiner willkürlichen physikalischen Hypothesen. Huygens hielt die von Descartes entwickelte Gravitationstheorie für unbrauchbar. Aber in seiner eigenen Lösung des Problems folgte er Descartes methodologisch.

Ausgangspunkt für Huygens' Theorie waren Untersuchungen über die Zentrifugalkraft. Wenn sich ein Körper auf einer gekrümmten Bahn bewegt, so verändert sich seine Bewegungsrichtung ständig. Aber auch die Geschwindigkeit verändert sich. Deshalb kann der krummlinigen Bewegung eine gewisse kontinuierliche Geschwindigkeitsveränderung zugeschrieben werden. Die Beschleunigung wird durch eine beständig auf den Körper wirkende Kraft hervorgerufen. Ein an einen Faden gehängtes, zur Drehung gebrachtes Gewicht bewegt sich infolge der Spannkraft des Fadens, die zum Zentrum gerichtet ist, auf einem Kreise. Huygens stellte fest, daß die zentripetale Beschleunigung um so größer sein muß, je schneller sich der Körper bewegt, und daß sie in gleichen Kreisen dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist. Die Bewegung im Kreis ist Ergebnis des Gleichgewichts von Zentripetal- und Zentrifugalkraft, zu der noch die Trägheit kommt, die tangential gerichtet ist. Durch die Zentrifugalkraft erklärte Huygens den verlangsamten Gang der Pendeluhren, die Jean Richer 1671 von Paris nach Cayenne mitgebracht hatte. Die Zentrifugalkraft ist am Äquator am größten. Sie wirkt der Schwere entgegengesetzt und vermindert sie mit der Annäherung an den Äquator. Daher vermindert sich in den Tropen alle Beschleunigung des Pendels.

Huygens benutzte den Begriff der Zentrifugalkraft, um eine kinetische Gravitationstheorie zu entwickeln. In einer sich drehenden Flüssigkeit, zum Beispiel im Wasser, schwimmende leichte Kügelchen werden zum Drehungszentrum gestoßen. Die Bewegung der leichten Kügelchen zum Zentrum ist nach dem Archimedischen Gesetz ihrer Verdrängung durch Wasser analog. Jedenfalls gravi-

[31] J. Le Rond d'Alembert, Einleitende Abhandlung zur Enzyklopädie, Berlin 1958, S. 98.

tieren sie zum Zentrum der sich drehenden Flüssigkeit. Descartes wollte mit einer ähnlichen Analogie die Gravation schwerer Körper zum Zentralkörper erklären, den er als Zentrum des sich bewegenden flüssigen Wirbels ansah. Huygens hatte in seiner „Untersuchung über die Ursache der Schwere" gezeigt, daß die Schwere nicht durch die Zentrifugalkraft eines um die Erde kreisenden Wirbels erklärt werden kann. In diesem Falle wäre die Schwere nicht auf das Zentrum der Erde, sondern auf ihre Achse gerichtet, die als Wirbelachse dient. Die Zentrifugalkraft wirkt überall, nur nicht am Äquator, nicht längs dem Erdradius, sondern längs einer Parallele zu ihm. Huygens untersucht die Gravitationstheorie mit einem exakteren quantitativen Kriterium. Er zeigt, daß die Wirbelbewegung bedeutend schneller sein müßte, um die Schwerkraft auf der Erdoberfläche erklären zu können. Schließlich müßte die Schwere der Dichte reziprok sein, da die dichtesten Körper zur Wirbelperipherie streben würden. Daher nimmt Huygens an, daß die Himmelsmaterie, die mit ihrer Bewegung die Schwere der irdischen Körper hervorruft, sich hinsichtlich der Erde nach verschiedenen Seiten verlagert. Die Teilchen dieser Materie beschreiben um die Erde sehr verschiedenartige Kreise, und deshalb ist auch die Erde ihr gemeinsames Zentrum.

Wir kommen nun zu einer anderen Aufgabe des Äthers — zur Ausbreitung des Lichts.

Descartes hat seine Lichttheorie in der „Untersuchung über das Licht" in seiner „Dioptrik", in einigen Kapiteln der „Meteore" und im III.Teil der „Prinzipien der Philosophie" dargelegt. Seine Auffassung von der Wahrnehmung des Lichts finden wir in der Schrift „Vom Menschen". Aber Descartes hat bei Untersuchung der Lichtbrechungsgesetze in der „Dioptrik", der Ausbreitung des Sonnen- und Sternenlichts in den „Prinzipien der Philosophie" und der physiologischen Optik in der Abhandlung „Vom Menschen" eigentlich keine klare Vorstellung von dem physikalischen Prozeß vermittelt, welcher der Lichtausbreitung zugrunde liegt. In Descartes' Arbeiten zur Optik finden sich viele äußere Analogien. Viele Stellen sind z. B. der Analogie zwischen einem Beobachter, der die Abbildung der Gegenstände wahrnimmt, und einem Blinden gewidmet, der die Gegenstände mit dem Stock fühlt. Unter Benutzung dieser Analogie sagt Descartes, daß das von den Körpern ausgesandte Licht eine schnelle Bewegung darstellt, die durch die Luft oder andere durchsichtige Medien ebenso zu unserem Auge geht wie die Bewegung oder der Widerstand des Körpers bis zur Hand des Blinden durch den Stock. „Es darf Ihnen nicht verwunderlich erscheinen, daß die Lichtstrahlen sich momentan von der Sonne bis zu uns ausbreiten, denn bekanntlich geht die Wirkung, die das eine Ende des Stockes in Bewegung setzt, im gleichen Augenblick auf das andere über und daß sie sich solcherart selbst in dem Falle ausbreiten kann, wenn die Entfernung größer als die zwischen der Erde und den Himmeln wäre."[32]

Mit der gleichen Analogie erklärt Descartes auch den Unterschied der Farben: „... der Unterschied, der von einem Blinden zwischen Bäumen, Steinen, Wasser

[32] R. Descartes, Oeuvres, t. II, a. a. O.

und anderen derartigen Gegenständen mit Hilfe seines Stockes festgestellt wird, scheint ihm nicht geringer zu sein als der zwischen roten, gelben, grünen und anderen Farben."[33]

Nach Descartes vermag der Blinde die Eigenschaften der ihn umgebenden Körper nicht nur in dem Fall zu erkennen, wenn der Stock diese Körper berührt, sondern auch, wenn er, die Körper mit dem Stock abtastend, diesen in Bewegung setzt. Ebenso vermag man sich vorzustellen, daß vom Auge Strahlen ausgehen, die die Gegenstände abtasten. Solche Vorstellungen — Überreste antiker Vermutungen — wurden noch bis ins 17. Jahrhundert benutzt. Descartes hielt sie für solche Tiere gerechtfertigt, die im Dunkeln sehen. Der Mensch nimmt das Licht der Farbe nur wahr, wenn die Gegenstände selbst leuchten oder beleuchtet sind und auf das Auge wirken.

Descartes vertritt die Auffassung, daß der Lichtstrahl den verschobenen Teil eines Mediums darstellt, das sich zwischen Auge und Gegenstand befindet. Dieses Medium besteht aus Teilchen zweiten Elements. Dabei nimmt Descartes keineswegs an, daß die Verschiebung allmählich von Punkt zu Punkt längs des Strahls erfolgt. Der verschobene Teil des zweiten Elements ist wirklich ein Stab, ein absolut fester Körper, der das Licht augenblicklich, mit unendlicher Schnelligkeit, übermittelt. Descartes maß der unendlich schnellen Ausbreitung des Lichts entscheidende Bedeutung bei.

In einem Brief an Isaac Beekman, der gegen die augenblickliche Übertragung des Lichtes Einwände erhob, schrieb Descartes: „Für mich ist diese Theorie so unbezweifelbar, daß sich, falls ihre Falschheit nachgewiesen werden würde (was unmöglich ist), ich mich für einen Menschen zu halten bereit wäre, der von Philosophie überhaupt nichts versteht ... Du glaubst unserer Erfahrung so sehr, daß Du Deine Bereitschaft erklärst, all Deine Philosophie für falsch zu halten, wenn es keine Zeitzwischenräume zwischen dem Augenblick gibt, da die Bewegung der Laterne sichtbar ist, und dem Moment, da sie in Bewegung gesetzt wird. Ich erkläre Dir hingegen, daß meine ganze Philosophie bis in ihre Grundfesten erschüttert wäre, wenn ein solcher Zwischenraum durch die Beobachtung festgestellt werden würde."[34]

Die Vorstellung einer allmählichen Übermittlung von Deformationen von Punkt zu Punkt ist in orthodoxen cartesischen Begriffen tatsächlich schwer zu formulieren. Nicht Descartes, sondern Huygens vermochte eine Theorie der Lichtwellen aufzustellen, die sich mit endlicher Geschwindigkeit bewegen. Huygens' Wellentheorie des Lichtes entstand zu einem Zeitpunkt, da die Korpuskulartheorie weit verbreitet war. Das wichtigste Argument für die Korpuskulartheorie des Lichtes war seine geradlinige Ausbreitung. Hätte das Licht Wellencharakter, so würde es Hindernisse umgehen, und der Schatten hätte keine deutlichen, ihn vom beleuchteten Raum abhebenden Grenzen. Aber gerade solche Erscheinungen wurden von Francesco Maria Grimaldi sichtbar gemacht, der in

[33] Ebenda.
[34] Oeuvres de Descartes, publ. par Ch. Adam et P. Tannery, Correspondance, Bd. I, Paris 1897, S. 307–308.

seinem postum erschienenen Werk „Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride" (1665) die Beugung des Lichtes entdeckt hatte.

Im Jahre 1678 hielt Huygens vor der Französischen Akademie der Wissenschaften zu Paris einen Vortrag über den Wellencharakter des Lichtes. Als bald darauf in Frankreich die Verfolgungen der Protestanten bedrohliche Formen annahmen, verließ er Paris, und erst im Jahre 1690 erschien in Huygens' Heimatstadt Leiden seine „Abhandlung über das Licht".

Ausgangspunkt von Huygens' Untersuchungen ist die Vorstellung vom Licht als einer Bewegung der Materie. Aber die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung und die ungehinderte wechselseitige Durchdringung der Lichtstrahlen ließen Huygens zu der Überzeugung kommen, daß man das Licht nicht als allmähliche Verschiebung von materiellen Teilchen ansehen kann.

Huygens machte das Wesen des Lichtes in Analogie zur Fortpflanzung des Schalls deutlich. Er formulierte die Wellentheorie des Lichtes und führte für sie eine Reihe von Beweisen an, darunter die endliche Lichtgeschwindigkeit.

Das Licht entsteht durch Impulse, welche die sich bewegenden Körperteilchen den Ätherteilchen mitteilen. Die Ätherteilchen sind außerordentlich fest. Diese Festigkeit wird durch die gewaltige Geschwindigkeit der Lichtausbreitung erklärt. Huygens bleibt nicht bei den Ursachen für die Festigkeit der Ätherteilchen stehen; er verwirft im Vorübergehen die Idee von ihrer komplizierten Zusammensetzung und von der unendlichen Hierarchie der Materieteilchen, welche die Kompliziertheit der Naturerscheinungen erklären. „Um nun diese Bewegungsart auf diejenige anzuwenden, durch welche das Licht erzeugt wird, so hindert uns nichts, die Annahme zu machen, daß die Ätherteilchen aus einer Materie bestehen, welche der vollkommenen Härte sich so sehr nähert und so große Elastizität besitzt, als wir wollen. Für den vorliegenden Zweck brauchen wir weder die Ursache für eine solche Härte noch diejenige für die Elastizität zu untersuchen, da diese Betrachtung uns zu weit von unserem Gegenstand abführen würde. Ich möchte jedoch beiläufig bemerken, daß man sich vorstellen kann, daß die Ätherteilchen trotz ihrer Kleinheit noch aus anderen Teilchen zusammengesetzt sind und daß ihre Elastizität in der äußerst raschen Bewegung einer feinen Materie besteht, welche sie von allen Seiten durchdringt und ihre Verkettung so ordnet, daß dieser flüssigen Materie ein möglichst freier und leichter Durchgang gewährt wird. Es stimmt dies mit der Erklärung überein, welche *Descartes* von der Elastizität gibt; nur setze ich nicht wie er Poren in Form von hohlen, runden Kanälen voraus. Man darf übrigens nicht denken, daß in der vorstehenden Anschauung etwas Absurdes oder Unmögliches liegt; im Gegenteil ist es recht glaublich, daß die Natur gerade diese unendliche Abstufung verschiedener Größen der Körperteilchen und die mannigfachen Grade ihrer Geschwindigkeit dazu benutzt hat, so viele wundervolle Wirkungen hervorzubringen."[35]

Wie breiten sich nun die Lichtwellen aus? Hier formuliert Huygens sein bedeutendes Wellenprinzip. Es besteht darin, „... daß jedes Teilchen des Stoffes,

[35] Ch. Huygens, Abhandlung über das Licht, Leipzig 1890. S. 10–11 (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 20.) S. 19.

in welchem eine Welle sich ausbreitet, nicht nur dem nächsten Teilchen, welches in der von dem leuchtenden Punkte aus gezogenen geraden Linie liegt, seine Bewegung mitteilen muß, sondern notwendig allen übrigen davon abgibt, welche es berühren und sich seiner Bewegung widersetzen. Daher muß sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist."[36]

Huygens erklärt auch die Erscheinungen der Reflexion und Brechung des Lichtes mit der Wellentheorie. Nach Newtons Korpuskulartheorie ziehen sich die Lichtteilchen und die Teilchen des Mediums beim Übergang des Lichtes in ein dichteres Medium gegenseitig an und gewinnen eine zusätzliche Beschleunigung, senkrecht zur Oberfläche des dichten Mediums. Deshalb weichen sie zu dieser Senkrechten hin ab. Huygens zeichnet ein anderes Bild von der Lichtbrechung. Eine Lichtwelle, die die Oberfläche eines festeren Mediums erreicht, ruft in ihren Punkten neue Wellen hervor. Sie sind langsamer als im ersten Medium. Fällt Licht schräg auf die Oberfläche eines festen Mediums, so erreichen verschiedene Strahlen des Lichtbündels diese Oberfläche in verschiedenen Zeitmomenten, und deshalb entstehen die Wellen im neuen Medium nicht gleichzeitig. Die Front der Wellen hat daher einen niedrigeren Anstiegswinkel, das Licht wird gebrochen.

Eine der wichtigsten empirischen Grundlagen der Wellentheorie des Lichtes war die den Auffassungen Descartes' widersprechende endliche Lichtgeschwindigkeit. Sie wurde durch astronomische Beobachtungen des dänischen Mathematikers Olaf Römer erstmalig relativ genau bestimmt. Römer entdeckte 1675 einige Verfrühungen oder Verspätungen der Verfinsterungen der Mediceischen Sterne, d. h. der Jupitertrabanten, in Abhängigkeit davon, in welcher Entfernung vom Jupiter sich die Erde zu dieser Zeit befindet. Wenn Jupiter weiter von der Erde entfernt ist, erfolgt die Verfinsterung der Trabanten, ihr Eintreten in den Jupiterschatten, mit Verspätung, wenn hingegen die Planeten einander näher stehen, so erfolgt die Verfinsterung vorzeitig. Römer erklärte diesen Umstand dadurch, daß im ersten Falle das Licht mehr Zeit braucht, um vom Jupiter zur Erde zu gelangen. Wenn man die Entfernung zwischen Erde und Jupiter sowie die Verspätung und Überholung der Trabantenfinsternis kannte, war eine Berechnung der Lichtgeschwindigkeit möglich, sie kam der Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum, d. h. von 300000 km/s, sehr nahe.

5. *Die Physiologie Descartes'*

Die cartesische Physik hätte ihre Aufgabe nicht erfüllt, wenn sie nicht versucht hätte, Erscheinungen des Lebens mit rein kinetischen Modellen zu erklären. In Descartes' Physiologie finden sich besonders viel willkürliche Hypothesen, aber gleichzeitig wird hier der Zusammenhang zwischen dem cartesischen System und der positiven Entwicklung der Physiologie des 17. und 18. Jahrhunderts deutlich. Welcher Grundgedanke brachte die physiologischen Kenntnisse dieser Zeit voran? Welche Idee verband die Physiologie mit den anderen Disziplinen, bezog die physiologischen Entdeckungen in das allgemeine Weltbild ein?

[36] Ebenda, S. 23.

Der Gedanke einer mechanischen Erklärung der Lebensprozesse inspirierte die Physiologie. Die physiologischen Entdeckungen des 17. Jahrhunderts wurden in dem Maße Bestandteil des allgemeinen Weltbildes, wie sie eine mechanische Deutung erfuhren. Kepler brachte das Auge zu optischen Geräten in Analogie, und da die Optik prinzipiell als mechanisch erklärbar angesehen wurde, wurden Anatomie und Physiologie des Auges zu einem Teil des allgemeinen Naturbildes. Die Mechanik des lebenden Organismus, wie sie von Giovanni Alfonso Borelli erarbeitet wurde, war ein wesentlicher Bereich seiner allgemeinen mechanischen Vorstellungen. William Harveys große Entdeckung des Blutkreislaufes fand sofort in der mechanischen Naturphilosophie ihren Platz, vor allem, weil sie sich leicht mechanisch interpretieren ließ. Als Descartes den tierischen Körper mit einer Maschine identifizierte, war dies Ausdruck der tatsächlichen Bestrebungen der Physiologie des 17. Jahrhunderts. Borelli und seine Nachfolger, die sogenannten Iatromechaniker, verglichen den Organismus mit einer Maschine ihrer Zeit. Sie führten die biologischen Prozesse unmittelbar auf mechanische zurück und wichen Prozessen aus, die wir heute als biophysikalische oder biochemische bezeichnen würden. Die Iatromechaniker erklärten die Verdauung mit der mechanischen Zerreibung und Zermalmung der Nahrung und hielten es für prinzipiell unzulässig, zur Erklärung organischer Funktionen auf chemische Reaktionen zurückzugehen. Mechanizistische Vorstellungen hegte auch eine Vielzahl von Konstrukteuren des 17. und 18. Jahrhunderts, die automatisches Spielzeug schufen. Derartiges Spielzeug gab es im 17. und vor allem im 18. Jahrhundert in nicht geringer Zahl. Im 18. Jahrhundert wurden die von Jacques de Vaucanson konstruierten, durch ein Uhrwerk betriebenen Automaten (ein Flötenspieler, ein Pfeifer und eine Ente) besonders bekannt. Es läßt sich vermuten, daß sich Vaucanson nicht nur von der Konstruktionspräzision, sondern auch von einer mehr oder weniger bewußten Identifizierung von Organismus und Maschine leiten ließ. Jedenfalls unterstützte dieser Gedanke bei den progressivsten Kreisen der europäischen Gesellschaft das Interesse an Vaucansons Konstruktionen, und dieses Interesse läßt sich keinesfalls auf bloße Liebhaberei reduzieren. Das gilt auch für die noch komplizierteren Konstruktionen der Brüder H. L. J. Droz und P. J. Droz. Der ältere Droz konstruierte einen mechanischen, mit einer Feder schreibenden Knaben, der jüngere Droz eine mechanische Pianistin, die nicht nur Lieder spielte, sondern auch beim Spielen ihren Händen mit den Augen folgte und sich nach Beendigung des Spiels vor dem Publikum verbeugte.

Helmholtz schrieb: „Es würde unbegreiflich sein, daß Männer, wie die genannten, deren Talent sich mit den erfindungsreichsten Köpfen unseres Jahrhunderts messen kann, so viel Zeit und Mühe und diesen Aufwand von Scharfsinn an die Ausführung solcher Automaten gewendet hätten, die uns nur als eine äußerst kindliche Spielerei erscheinen, wenn sie nicht gehofft hätten, dieselbe Aufgabe auch in wirklichem Ernste lösen zu können."[37]

[37] H. v. Helmholtz, Über die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik, in: Vorträge und Reden, 1. Bd., 5. Aufl., Braunschweig 1903, S. 51–52.

Helmholtz hat vollauf recht. Wenn die spanische Inquisition, die den älteren Droz samt seinem „schreibenden Knaben“ in den Kerker warf, aufrichtig davon überzeugt war, daß der Mechaniker einen lebenden Menschen zu schaffen vermöge, so hofften die Konstrukteure solcher Automaten auch selbst auf den Erfolg ihres phantastischen, aber durchaus nicht mystischen Unterfangens. Die meisten dieser Konstrukteure glaubten nicht an die Magie; jedenfalls rechneten sie nicht darauf, mit magischen Verfahren einer Gesamtheit von Rädern und Hebeln eine lebende Seele eingeben zu können. Sie meinten vielmehr, daß auch die wirklichen Menschen ihrem Wesen nach eine Kombination einfachster mechanischer Elemente wären. Somit war die gedankliche Grundlage für die Konstruktion von Spielautomaten nicht die Magie, sondern eine extrem mechanische Erklärung der Erscheinungen.

Diese Illusionen lagen natürlich außerhalb der Naturwissenschaft, bedienten sich aber naturwissenschaftlicher Ideen. Wichtigster naturphilosophischer Ausdruck dieses Gedankens war die cartesische Physiologie. Descartes hatte lediglich behauptet, daß das Tier mit einer Maschine gleichzusetzen sei, im 18. Jahrhundert wurde diese These darüber hinaus auch auf den Menschen angewendet.

Descartes entwickelt folgendes Bild. Alle Teilchen, aus denen der menschliche Organismus besteht, sind irgendwo gesammelt und ebenso wie im menschlichen Körper verteilt. Eine derartige Gesamtheit sich bewegender Teilchen wird sich in der Struktur und den Bewegungen der einzelnen Teilchen nicht vom menschlichen Körper unterscheiden. Descartes verneint die Frage, ob diese Gesamtheit materieller Teilchen den Menschen ausmacht. Ein solcherart konstruierter Mechanismus wird keine denkende Seele besitzen. Hier ist nicht nur die Grenze von Descartes' kinetischer Physiologie, sondern auch seiner ganzen Physik. Anders steht es nach Descartes, wenn man die Teilchen vereinigt, aus denen der tierische Organismus besteht. In diesem Falle wird sich der konstruierte Mechanismus in keiner Weise vom Lebewesen unterscheiden. Das Tier unterscheidet sich überhaupt nicht von der Maschine. Beide haben keine Empfindungen und kein Denken. Die mechanische Konstruktion kann also alle Lebensfunktionen der Tiere erklären, darüber hinaus auch diejenigen Funktionen des menschlichen Organismus, die den Lebensfunktionen der Tiere ähnlich sind.

Beim Aufbau des menschlichen Organismus aus materiellen Teilchen suchte Descartes eine Kraft, die alle Elemente des Organismus in Bewegung setzt. Diese Kraft sah er in der Wärme. Sie erklärt den Blutkreislauf. Descartes folgt in seiner Theorie des Blutkreislaufes William Harvey und stützte sich dabei auch auf eigene anatomische Beobachtungen. Zwar verfügte Descartes auf anatomischem Gebiet über gewisse gesicherte Kenntnisse, aber die Physiologie gab Mitte des 17. Jahrhunderts noch verhältnismäßig wenig Material für den Aufbau einer umfassenden Theorie der Lebensfunktionen. Deshalb enthalten Descartes' physiologische Vorstellungen und speziell die Auffassungen vom Blutkreislauf noch phantastischere Hypothesen als seine Kosmogonie. Nach Descartes beweist Harveys Entdeckung, daß man die physiologischen Probleme gänzlich auf mechanische Ursachen zurückführen und mit rein räumlichen, quantitativen Begriffen erklären kann. In der „Untersuchung über das Licht“ behauptet Descartes, der Körper der Bewohner einer gewissen hypothetischen Welt sei dem unseren ähnlich. Doch

keinem von ihnen hat Gott eine vernunftbegabte Seele eingegeben, sondern jedem in sein Herz eine Flamme gesetzt, ähnlich der, die im gärenden Stoff oder im spontan erwärmten feuchten Heu ist. Die Existenz einer solchen ständigen Wärmequelle im menschlichen Körper kann alle den Lebewesen eigenen organischen Funktionen hervorrufen. Somit ist das Leben keineswegs mit der Existenz einer nichtmateriellen Kraft verbunden. Rein mechanische Prozesse erklären alle Lebensfunktionen der Tiere. Die analogen Funktionen des menschlichen Organismus laufen ebenfalls rein mechanisch ab. Die Annahme einer ständigen Wärmequelle im menschlichen Körper ist ausreichend, um die Lebensfunktion aus dieser Voraussetzung ableiten zu können. An dieser Stelle stößt nun die cartesische Physik an eine theologische Schranke.

„Ich erwog ..., welche Funktionen unter dieser Annahme im menschlichen Körper stattfinden können, und fand, daß es alle diese sind, die sich unbewußt in uns vollziehen können, also ohne Mitwirkung der Seele, d. h. jenes Teiles von uns, der nicht körperlich ist und dessen Wesen ... nur im Denken besteht. Es sind die nämlichen Funktionen, die augenscheinlich auch die Tiere mit uns gemein haben, die keine Vernunft besitzen. Ausgeschlossen dagegen sind bei jener Annahme sämtliche Funktionen, die vom Denken abhängen und lediglich uns als Menschen zukommen. Letztere fand ich aber sämtlich wieder, sobald ich nachher die Annahme machte, Gott habe eine vernünftige Seele erschaffen und sie mit jenem Körper in näher beschriebener Weise verbunden."[38]

Descartes beschränkt also den mechanistischen Standpunkt in der Physiologie auf all die Funktionen, die Mensch und Tier gleichermaßen eigen sind. Bewegungen der Seele sind nur dem Menschen eigen und werden metaphysisch durch das Vorhandensein einer mit dem Körper verbundenen vernünftigen Seele erklärt. Im Bereich der physiologischen Funktionen hingegen, die nach Descartes Tier und Mensch gleichermaßen eigen sind, läßt die cartesische Physik keine nichtmateriellen Faktoren zu. Durch detaillierte und im gewissen Sinne willkürliche Konstruktionen beweist Descartes den rein mechanischen Charakter der physiologischen Prozesse. Er häuft für diesen Zweck erdachte anatomische Einzelheiten, Ventile, Röhren, Seile usw. auf und macht dabei auch vor zu jener Zeit unklaren Punkten der physiologischen Forschung nicht halt. Er will nämlich zeigen, daß rein mechanische Ursachen alle Naturerscheinungen zu erklären vermögen, und dort, wo die Wissenschaft dafür kein ausreichendes Faktenmaterial liefert, häuft er Hypothesen auf, ohne einen Schritt von seinem Ziele abzuweichen. Schließlich wird aus ursprünglichen mechanischen Postulaten ein umfassendes Bild der konkreten Lebensäußerungen abgeleitet. Descartes kümmerte sich überhaupt nicht um die Phantastik der einzelnen Hypothesen. Für ihn war es ausreichend, daß sie möglich waren. Damit war für ihn bereits die Eindeutigkeit des mechanistischen Weltbildes bewiesen. Deshalb ist Descartes' Physiologie für ihren Schöpfer keine schwache Stelle, wie Philosophen und Naturforscher der folgenden Generationen meinten, sondern im Gegenteil der höchste Ausdruck der wissenschaftlichen Methode seiner Physik.

[38] Descartes, Abhandlung über die Methode, a. a. O., S. 54.

III. DYNAMIK

1. *Die Physik der Prinzipien*

Die Naturwissenschaft im letzten Viertel des 17. und in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts unterscheidet sich wesentlich von der Naturwissenschaft in der ersten Hälfte und in der Mitte des 17. Jahrhunderts. Das gilt nicht nur hinsichtlich des erreichten Wissensstandes, sondern auch für den wissenschaftlichen Stil. Die Anschauungen Galileis und seiner Zeitgenossen wiesen noch eine gewisse Unvollkommenheit auf. Die Begriffe der Trägheit, der Masse, der Beschleunigung, der Kraft waren noch nicht eindeutig bestimmt, sie wurden in verschiedener Bedeutung angewandt. In dieser Zeit gab es noch keine festen Grenzen zwischen den verschiedenen Wissenschaftsbereichen. Die Natur wurde weit weniger als später für absolut unveränderlich angesehen. Die Vorstellung von der Unveränderlichkeit der Natur verfestigte sich erst allmählich und wurde besonders in den Richtungen des naturwissenschaftlichen Denkens deutlich, die Engels als „Naturwissenschaft der *alten* Newton-Linnéschen Schule" bezeichnete.[1]

Die Geschichte der Wissenschaft hat die Beschränktheit der Newton-Linnéschen Naturwissenschaft gezeigt, sie aber gleichzeitig als sehr wichtige historische Etappe beim Aufbau eines wissenschaftlichen Weltbildes gewürdigt. Auf den ersten Blick hin ist der Begriff des Weltbildes in dieser, durch die Namen Newton und Linné bezeichneten Zeit weniger anwendbar als in der voraufgehenden. In der Periode nach Newton verlieren die hypothetischen Bilder der cartesischen Physik allmählich an Einfluß, die Wissenschaft differenziert sich, und die Forscher, die sich auf Einzeldisziplinen zurückgezogen haben, neigen nicht zur Ausarbeitung von umfassenden Vorstellungen über den Kosmos. In der Wissenschaft entwickelt sich eine phänomenologische Tradition, und Newtons bekannter Ausspruch gegen die Hypothesen setzt der Konstruktion anschaulicher Bilder und Modelle im gewissen Sinne ein Ende. Aber dessenungeachtet hat die Naturwissenschaft am Ende des 17. und in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts ein bedeutsameres wissenschaftliches Bild vom Weltgebäude geschaffen als die Auffassungen der vorherigen Periode. Diese Einschätzung gilt vor allem für das Newtonsche System. Durch Newtons Mechanik wurde das Weltbild unvergleichlich zuverlässiger. Es verallgemeinerte exakt und eindeutig die durch das Experiment vorgegebenen empirischen Daten. Das Weltbild verlor seinen verschwommenen qualitativen Charakter und bezog exakte quantitative Wechselbeziehungen ein.

[1] F. Engels, Dialektik der Natur, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, Berlin 1962, S. 515.

Newtons Weltbild war mechanisch. In seiner Zeit schien sich unter den Wissenschaftlern der Gedanke von der absoluten Rückführbarkeit der Naturgesetze auf die Gesetze der klassischen Mechanik fast von selbst zu verstehen. Newtons „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie" (sie erschienen erstmalig 1687) wurden zum Evangelium der Wissenschaftler. Bevor wir zur Analyse der historischen Quellen der klassischen Mechanik, zur Charakterisierung der Methode Newtons, zur Darlegung der klassischen Raum-Zeit-Lehre und des Gravitationsgesetzes kommen, wollen wir eine allgemeine Vorstellung von der Struktur dieser Arbeit Newtons geben.

Die „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" umfassen drei Bücher. Das erste Buch behandelt die Bewegung der Körper unter dem Einfluß von Kräften, das zweite die Bewegung solcher Körper, die einen Widerstand erleiden, das dritte Buch handelt vom Weltsystem. Zu Beginn des ersten Buches gibt Newton eine Bestimmung der Menge des Stoffs, der Bewegungsmenge, der Trägheit und der Kraft. Darauf folgt eine „Anmerkung", in der die absolute und die relative Zeit, der Raum und die Bewegung definiert werden. Weiter werden die bekannten klassischen Gesetze und einige ihrer Folgerungen angeführt. Nach dieser Einführung legt der Autor die Grundgesetze der Bewegung der Körper sowie einige Begriffe der Analyse des unendlich Kleinen dar. Dieser Teil der „Prinzipien" erleichtert dem Leser das Verständnis der darauffolgenden Beweise einer Reihe von mechanischen Theoremen. Dann entwickelt Newton in sieben Abschnitten die Lehre von der Bewegung der Körper, auf die Zentralkräfte einwirken. Die grundlegenden Theoreme dieses Teils der „Prinzipien" behandeln die Bewegungen materieller Punkte, die einander mit einer dem Quadrat der Entfernungen umgekehrt proportionalen Kraft anziehen. Danach geht der Autor von der Anziehung materieller Punkte zur Anziehung realer Körper über.

Das zweite Buch behandelt die Bewegung der Körper, welche einen Widerstand erleiden, und das Gleichgewicht der Flüssigkeiten. Newton untersucht, wie ein Körper, der der Schwerkraft unterliegt, sich im widerstehenden Medium bewegen wird. Besonders behandelt er die Pendelbewegung im widerstehenden Mittel. Außerdem werden hier die Gesetze der Hydrostatik formuliert. Einer der Grundgedanken dieses Teils der „Mathematischen Prinzipien" ist die Widerlegung der Wirbeltheorie Descartes'. Newton untersucht das Problem der Rotation der Flüssigkeit und kommt zu dem Schluß, daß sie die Planetenbewegung nicht zu erklären vermag.

Im dritten Buch wird das astronomische Weltsystem dargelegt. Ihm werden in der ersten Ausgabe der „Prinzipien" „drei Regeln der philosophischen Schlußfolgerungen" (regulae philosophandi) vorangestellt. Dann bringt Newton die grundlegenden astronomischen Beobachtungen, auf deren Grundlage und mit Hilfe des gesamten in den „Prinzipien" dargelegten Materials ein wahres Bild vom Weltall gewonnen werden kann. Aus solchen Beobachtungen wird die These von der Universalität der Gravitation und ihre Proportionalität zu den Massen der Körper abgeleitet.

Newton behandelt außerdem die Bewegungsgesetze der Sonne und der Planeten. Am Ende des Buches wird bewiesen, daß die Erde, wie jeder sich um die

eigene Achse drehende Planet, längs der Drehungsachse abgeplattet sein muß. Isaac Newton behandelt weiter das Gewicht der Körper an unterschiedlichen geographischen Orten und erklärt schließlich Ebbe und Flut durch die Gravitation der Himmelskörper. In der zweiten und den folgenden Ausgaben der „Mathematischen Prinzipien" wurden diesem Abschnitt Theoreme über die Mondbewegung unter dem Einfluß der Sonnengravitation beigegeben.

Im Jahre 1713 erschien die zweite Ausgabe der „Mathematischen Prinzipien". Auf Empfehlung von Richard Bentley, Master des Trinity College — Newton war an diesem College Professor —, wurde diese Ausgabe von Roger Cotes redigiert. Dieser war ein entschiedener Gegner des Materialismus und Cartesianismus. Er schrieb ein Vorwort, das gegen die cartesischen Auffassungen gerichtet war und die religiösen Motive von Newtons Buch betonte.

Welches sind nun die wichtigsten Gedanken der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie"?

Newton betont unmißverständlich, daß Beobachtung und Experiment die einzige Quelle seiner Gesetze sind. Diese Behauptung und der berühmte Satz „hypotheses non fingo" — Hypothesen ersinne ich nicht — wurden in der Folgezeit, in der Wissenschaft des 18. und 19. Jahrhunderts, zu Losungen eines beschränkten Induktionismus. Man kann nach Newton die Grundbestimmungen der Materie, des Raumes, der Zeit und der Bewegung aus der Erfahrung ableiten. Die Materie unterscheidet sich vom Raum, die materiellen Körper bewegen sich im Vakuum. Der leere Raum ist unbeweglich und absolut. Die Verschiebung in diesem Raum ist absolute Bewegung. Die absolute Bewegung wird durch eine auf den Körper wirkende Kraft verursacht und ist der Beschleunigung proportional. Die Bewegung der Himmelskörper vollzieht sich unter dem Einfluß der Trägheit und der Gravitation. Diese bewirken, daß sich die Körper in elliptischen Bahnen um die Zentralkörper drehen, zu denen sie gravitieren. Die Gravitation ist der Masse proportional und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung zwischen den Körpern. Sie verbindet alle Naturkörper. Das Gesetz der universellen Gravitation erklärt, warum das Weltsystem seine Bewegung nach dem „ihm von Gott versetzten ersten Anstoß" unverändert beibehält.

Welches sind nun die historischen Wurzeln der Newtonschen Anschauungen? Die rein kinetische cartesische Physik macht im gewissen Sinne aus zweierlei Umständen neuen Anschauungen Platz. Erstens war sie eine historisch progressive allgemeine Deklaration des Mechanismus. Sie beantwortete jedoch Teilfragen nicht eindeutig, belastete die Wissenschaft mit phantastischen Hypothesen, willkürlich gewählten Modellen und apriorischen Konstruktionen. Durch die Gewinnung naturwissenschaftlicher Kenntnisse, die sich aus der Entwicklung der Produktivkräfte im 17. Jahrhundert ergaben, war die Wissenschaft aus dem engen Gewand der cartesischen Wirbel und Elemente herausgewachsen. In der cartesischen Theorie mußte jede bedeutende Entdeckung mit den alten kinetischen Hypothesen mittels schnell erdachter neuer Hypothesen in Übereinstimmung gebracht werden. Die cartesische Physik begann einem zerfallenden Haus zu ähneln, in dem die wahllos aufgestellten Pfeiler weniger die zerbröckelnden Mauern stützten, als mit ihrem Gewicht zu zerdrücken drohten. Die Entwicklung

der Naturwissenschaften erforderte Ideen und Methoden, vor allem die Möglichkeit, solche Gesetze zu benutzen, deren kinetische Natur der Wissenschaft noch nicht klar war.

Die anticartesischen Tendenzen entstammten aber noch einer anderen Quelle. Der Cartesianismus war eine Bedrohung für die Religion, und der cartesische Naturwissenschaftler war nicht nur bei Verteidigern feudalen Gedankengutes verdächtig, sondern auch in bürgerlichen Kreisen. Die Autorität der Kirche, oder wenigstens die Autorität der „natürlichen Religion", mußte gegenüber materialistischen und atheistischen Schlußfolgerungen aus der Wissenschaft verteidigt werden. Die kinetische Weltanschauung verblieb nicht lange innerhalb der Schranken des cartesischen Dualismus.

In Descartes' Philosophie war die Physik von der Metaphysik abgegrenzt. So blieb die Substantialität des Geistes unangetastet, und damit war das Recht auf eine relative Selbständigkeit der Physik erkauft. Hingegen machte im System Spinozas die Physik nicht vor den Grenzen halt, die dem Dualismus Descartes' eigen waren. Die ausgedehnte Substanz erhebt darauf Anspruch, einzige Substanz zu sein. Dieser materialistische Sinn der Philosophie Spinozas wurde von seinen Freunden nicht sofort erfaßt, seine Gegner empfanden ihn dagegen sofort. Nicht nur die Theologen, sondern auch die Deisten griffen Spinoza an.

Die Reaktion auf die materialistischen Schlußfolgerungen der Kinetik beschränkte sich nicht auf die Hetze gegen Spinoza. Die Verteidiger der Religion suchten die Grundbegriffe der Naturwissenschaften zu revidieren und einen Kompromiß zu erreichen, der von der Notwendigkeit der wissenschaftlichen Entwicklung und der Unzulässigkeit ihrer gnoseologischen Schlußfolgerungen ausgehen sollte. Einen Ausweg, wenn auch einen illusorischen, vermochte das große Kompromißgenie Leibniz zu finden.

Leibniz' Auffassungen werden wir später behandeln. Wir wollen zunächst auf die Entwicklung dynamischer Begriffe in England eingehen.

Die Besonderheiten der wissenschaftlichen Entwicklung im England des 17. Jahrhunderts haben sich einmal daraus ergeben, daß die Industrie auf einer höheren Stufe als auf dem Kontinent stand. Sie entstammen andererseits dem klassischen Kompromiß, mit dem der Kampf zwischen der englischen Bourgeoisie und den Landlords beendet worden war. In England bildeten sich spezifische Beziehungen zwischen Naturwissenschaft und Religion heraus. Die Verbrennung Giordano Brunos, die Propaganda der kopernikanischen Lehre und schließlich die Verurteilung Galileis hatten die Wissenschaft Italiens zu rein empirischen Forschungen gedrängt. Auf diesen Bereich beschränkte sich die Tätigkeit der Florentiner Akademie (Academia del Cimento) und anderer wissenschaftlicher Organisationen des 17. Jahrhunderts. Die Tätigkeit der Indexkongregation, der Jesuiten und der Inquisition wurde auf die gesamte katholische Welt ausgedehnt. Sie schränkte die Freiheit des wissenschaftlichen Schaffens ein. In England dagegen suchten sich die orthodoxen kirchlichen Kräfte auf die Naturwissenschaften zu stützen. In Italien hatte der Jesuit und Astronom Christoph Scheiner (1575—1650) Galilei bei der Inquisition denunziert, in England gaben Bentley und Cotes Newtons Werke heraus, wobei sie die theologischen

Aspekte seiner Auffassungen hervorhoben. Die religiöse Apologetik nahm in England eine bürgerliche Form an und verwendete gegen den Materialismus naturwissenschaftliche Argumente. In der ersten Boyle-Vorlesung (der leidenschaftliche Protestant Robert Boyle hatte in seinem Testament Mittel eingesetzt, damit man jährlich acht Vorlesungen zum Schutze des Christentums gegen den Atheismus abhalte), die Bentley 1692 hielt, sagte er, daß man den Atheismus nicht mit der Bibel widerlegen könne, sondern mit dem mächtigen Buch der sichtbaren Natur und den ewigen Tafeln des gesunden Verstandes.

Solcherart war das geistige Klima, in dem sich die dynamischen Auffassungen in der Wissenschaft Englands entwickelten. Dieses Klima festigte und hypertrophierte auf einer Tangente eine gesetzmäßige Windung der Wissenskurve. Worin bestand aber nun diese Windung? Wir wollen einige Besonderheiten der Newtonschen Methode etwas eingehender untersuchen, die später die Bezeichnung *Physik der Prinzipien* erhielten und der cartesischen *Physik der Modelle* entgegengesetzt wurden.

Im dritten Buch der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“ gibt Newton „Regeln der philosophischen Schlußfolgerungen“ (regulae philosophandi). Heute wie zur Zeit Newtons versteht man in England unter „Naturphilosophie“ die exakte Naturwissenschaft. Die Engländer bezeichnen ein gewöhnliches Thermometer als „philosophisches Instrument“. In diesem Gebrauch des Terminus „Philosophie“ wird eine von Bacon und Newton herkommende Tradition sichtbar. In den „regulae philosophandi“ wird die sogenannte induktive Methode formuliert. Die erste Regel fordert: „An Ursachen zur Erklärung natürlicher Dinge nicht mehr zuzulassen, als wahr sind und zur Erklärung seiner Erscheinungen ausreichen.“[2] Die weiteren beiden Regeln verlangen, daß gleichartigen Wirkungen dieselben Ursachen zugeschrieben werden, daß Eigenschaften der Körper, die weder verstärkt noch vermindert werden können und die allen Körpern zukommen, an denen man Versuche anstellen kann, für Eigenschaften aller Körper zu halten sind. Eine vierte, später hinzugefügte Regel besagt: In der Experimentalphysik muß man die aus den Erscheinungen durch Induktion erschlossenen Sätze so lange entweder für genau oder annähernd wahr halten, bis andere Erscheinungen eintreten, durch welche sie noch größere Genauigkeit erlangen oder Ausnahmen unterworfen werden.

Diese anticartesische Deklaration war auf den ersten Blick wirklich eine absolute Regel der Newtonschen Mechanik, die in den Augen Newtons und seiner Schüler keine hypothetischen Prämissen aufwies, gänzlich auf Tatsachen gegründet und deshalb endgültig, ewig und absolut war. Für die Physiker des 18. und 19. Jahrhunderts waren die „Mathematischen Prinzipien“ nicht nur eine Sammlung von Grundgesetzen und Theoremen, sondern auch Vorbild rein induktiver und deshalb absolut zuverlässiger Kenntnisse. In der naturwissenschaftlichen Literatur des 19. Jahrhunderts, vor allem in der englischen, finden sich

[2] I. Newton, Mathematische Principien der Naturlehre, mit Bemerkungen und Erläuterungen hrsg. v. Ph. Wolfers, Berlin 1872, S. 380. Wir verwenden im Text statt „Naturlehre“ den treffenderen Begriff „Naturphilosophie“.

viele Lobreden auf den Newtonschen Induktionismus. Eine kritische Untersuchung der „Mathematischen Prinzipien" zeigt jedoch, daß sich Newton auf bestimmte hypothetische Konstruktionen stützte. Seine Mechanik war das Bild einer unendlichen Welt; sie dehnte induktiv gefundene Vorstellungen auf das unendlich große Weltall und die mikroskopischen Erscheinungen aus. Stillschweigend wurde die Herauslösung einer bestimmten Seite der beobachteten Erscheinungen als wesentlich und die gedanklich vollzogene Eliminierung der übrigen vorausgesetzt. Die atomistischen Hypothesen waren noch sehr unklare, aber dennoch unzweifelhafte physikalische Voraussetzungen der „induktiven" Mechanik Newtons. Deshalb nahm die Entwicklung der Atomistik im 18. Jahrhundert so oft die Form der Erklärung der physikalischen Natur der Kräfte an, die in den „Mathematischen Prinzipien" phänomenologisch beschrieben und berechnet wurden.

Zur Zeit Newtons konnte die Wissenschaft noch kein eindeutiges und exakt kinetisches Bild liefern, das die makroskopischen Kräfte zu erklären vermocht hätte. Daher war Newtons Induktionismus für das 17. Jahrhundert die übersteigerte und verabsolutierte Ablehnung solcher Hypothesen, die infolge des beschränkten Wissensstandes die geforderte exakte Erklärung der Erscheinungen nicht zu geben vermochten. Aber das Gebäude der Newtonschen Mechanik konnte, historisch gesehen, ohne physikalische Hypothesen nicht errichtet werden. Dem analog war auch die experimentelle Methode durchaus nicht gänzlich empirisch. Man kann in der Wissenschaft ohne Ideen, ohne Vorstellungen vom Kausalzusammenhang der Tatsachen nicht experimentieren. Die Alchimisten erprobten zum Beispiel die Wirkung des Quecksilbers auf eine Lösung; sie schrieben aber gerade dem Quecksilber deshalb Wirkungsfähigkeit zu, weil etwa die rote Farbe seines Oxyds Symbol der Macht ist. Deshalb veränderten die alchimistischen Experimente auch nicht die allgemeine Struktur des wissenschaftlichen Denkens. Anders verhält es sich mit den Experimenten des 17. Jahrhunderts. Sie konnten den rationalen Kausalzusammenhang — den mechanischen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung beweisen. Grundlage der experimentellen Naturwissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts war die Idee des universellen mechanischen Kausalzusammenhangs der Naturerscheinungen.

Folglich bezeichnet nicht das Experiment selbst den Beginn einer neuen Epoche in der Naturwissenschaft, sondern vielmehr zuvor unbekannte Funktionen des Experiments, die sich aus der mechanischen Charakteristik des Weltbildes ergaben, das mit Hilfe des Experiments überprüft, bewiesen, entwickelt und bereichert wurde.

Grundlage der Experimente und Beobachtungen, aus denen Newton seine Gesetze ableitete, war die Annahme mechanischer Zusammenhänge zwischen den Erscheinungen.

Diese Idee hatte in der kinetischen Physik des 17. Jahrhunderts schon einen universellen, wenn auch bisweilen phantastischen Ausdruck erhalten. Wir werden noch sehen, daß kinetische Modelle vielen Bestimmungen und Gesetzen zugrunde lagen, denen eine rein empirische Entstehung zugeschrieben wurde. Newtons Mechanik stützte sich auf die abstrakten Kategorien des Raumes, der Zeit,

der Masse, der Kraft usw. Aber sie waren unmöglich rein induktiv aus bestimmten Experimenten zu gewinnen. Die Genesis der klassischen Physik zeigt, daß der Zusammenhang von Experiment und gewählter physikalischer Theorie nicht eindeutig ist. Diesen Zusammenhang hat Einstein (mit dessen entsprechenden Äußerungen wir uns noch beschäftigen werden) energisch betont, und er ist von der nichtklassischen Physik überzeugend nachgewiesen worden. Wir haben schon am Beispiel Galileis gesehen, daß das Inertialgesetz nicht aus einem einzelnen Experiment gewonnen werden konnte, weil es ja Kausalitätsvorstellungen erforderte. Diese Vorstellungen basierten aber auf einer breiten empirischen Basis, ergaben sich aus der Gesamtheit der damals bekannten Eigenschaften der physikalischen Welt. Deshalb entspricht die Legende von der analytischen Ableitung der Gesetze aus dem reinen Experiment (aus „einigen ausgewählten Erscheinungen", wie Cotes im Vorwort zur zweiten Ausgabe der „Mathematischen Prinzipien" schrieb) nicht dem wirklichen Wege des Aufbaus der Newtonschen Mechanik.

Newton hatte vielmehr ein ungegliedertes und deshalb chaotisches Bild der Bewegungen vor sich. Er wählte daraus die einfachste Abstraktion eines isolierten Körpers aus, darauf die zweier aufeinander einwirkender Körper usw. So gelangte er von sehr abstrakten zu immer weniger abstrakten Begriffen. Diese Methode finden wir bei Galilei wie bei Newton. Das erste Newtonsche Gesetz ist auf gewisse experimentelle Fakten gegründet: *„Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern."*[3] Weshalb wird gerade vom Luftwiderstand und von der Schwere als unwesentlichen Komponenten der Bewegung abgesehen, warum wird nur die Inertialkomponente gewählt? Das Kriterium für die Auswahl gerade dieser und nicht anderer Seiten der Wirklichkeit ergibt sich natürlich aus einer großen Zahl physikalischer Hypothesen und ist von einer einfachen mathematischen Interpretation des Experiments weit entfernt. Eine derartige Auswahl ist ohne eine mehr oder weniger klare Hypothese unmöglich.

Newton wandte sich entschieden gegen kinetische Hypothesen. Er schrieb: „Ich habe bisher die Erscheinungen der Himmelskörper und die Bewegung des Meeres durch die Kraft der Schwere erklärt, aber ich habe nirgends die Ursache der letzteren angegeben. Diese Kraft rührt von irgendeiner Ursache her, welche bis zum Mittelpunkte der Sonne und der Planeten vordringt, ohne irgend etwas von ihrer Wirksamkeit zu verlieren. Sie wirkt nicht nach dem Verhältnis der *Oberfläche* derjenigen Teilchen, worauf sie einwirkt (wie die mechanischen Ursachen), sondern nach dem Verhältnis der Menge fester Materie, und ihre Wirkung erstreckt sich nach allen Seiten hin, bis in ungeheure Entfernungen, indem sie stets im doppelten Verhältnis der letzteren abnimmt. Die Schwere gegen die Sonne ist aus der Schwere gegen jedes ihrer Teilchen zusammengesetzt, und sie nimmt mit der Entfernung von der Sonne genau im doppelten Verhältnis der Abstände ab, und dies geschieht bis zur Bahn des Saturns, wie die Ruhe der

[3] Ebenda, S. 32.

Aphelien der Planeten beweist; sie erstreckt sich ferner bis zu den äußeren Aphelien der Kometen, wenn diese Aphelien in Ruhe sind.

Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund dieser Eigenschaften der Schwere abzuleiten, und Hypothesen erdenke ich nicht. Alles nämlich, was nicht aus den Erscheinungen folgt, ist eine *Hypothese* und Hypothesen, seien sie nun metaphysische oder physische, mechanische oder diejenigen der verborgenen Eigenschaften, dürfen nicht in die Experimentalphysik aufgenommen werden. In dieser leitet man die Sätze aus den Erscheinungen ab und verallgemeinert sie durch Induktion. Auf diese Weise haben wir die Undurchdringlichkeit, die Beweglichkeit, den Stoß der Körper, die Gesetze der Bewegung und der Schwere kennengelernt. Es genügt, daß die Schwere existiere, daß sie nach den von uns dargelegten Gesetzen wirke, und daß sie alle Bewegungen der Himmelskörper und des Meeres zu erklären imstande sei."[4]

Wir erinnern an den Charakter der cartesischen Hypothesen. Keine dieser Hypothesen war die einzige mögliche Erklärung der Erscheinungen. Newton wollte nun gerade solche Prinzipien der Naturwissenschaft aufstellen, aus denen sich die aus astronomischen Beobachtungen gewonnenen Größen exakt und eindeutig ergaben. Sein Vorhaben war in gewisser Beziehung nicht weniger grandios als das des Descartes. Descartes machte die Wissenschaft von Begriffen der scholastischen Philosophie und akausalen willkürlichen Annahmen frei. Newton wollte sie von jeglicher Willkür befreien. Dies war ohne eine entschiedene Reinigung der Naturwissenschaft von akausalen hypothetischen Schlüssen nicht möglich. Die theologische Auffassung benötigte keine einheitlichen wissenschaftlichen Systeme. Eine Theorie war gut, wenn sie der Theologie diente. Sie war lediglich eine willkürliche Illustration theologischer Prinzipien. Eine andere Theorie hätte dieser Aufgabe ebenfalls gerecht werden können. Der Katholizismus forderte von der Wissenschaft Theorien „zum höheren Ruhm Gottes", was sie durchaus nicht eindeutig werden ließ.

Newton verlangte von der Wissenschaft völlige Eindeutigkeit. Jede spezielle Theorie muß nach unantastbaren exakten Begründungen suchen. Aufgabe Newtons ist die unstrittige, einzig richtige, absolut exakte Naturerklärung. Deshalb fordert er auch, daß die Wissenschaft von kinetischen Hypothesen gereinigt und die Natur auf der Grundlage von Gesetzen untersucht wird, die experimentell bewiesen sind.

Die Ablehnung der Hypothesen widerspricht auf den ersten Blick hin nicht nur dem Inhalt, sondern auch den Titeln der Newtonschen Arbeiten. Eine Denkschrift Newtons, die er Ende des Jahres 1695 der Royal Society einsandte, hat die Überschrift „Theorie des Lichtes und der Farbe, welche die Hypothese zur Erklärung der Eigenschaften des Lichtes enthält, die von dem Verfasser in den vorhergehenden Denkschriften dargelegt worden sind, sowie eine Beschreibung der wesentlichsten Erscheinungen der verschiedenen Farben dünner Blättchen und der Seifenblasen, die gleichfalls von den früher charakterisierten Eigenschaften des Lichts abhängen". Aber im Begleitschreiben zu diesem Artikel wird der rein didaktische Zweck dieser Hypothese deutlich.

[4] Ebenda, S. 511.

Im Text der Denkschrift finden wir eine Reihe von Hypothesen über den Äther — ein dünnes Gas, das den luftleeren Raum füllt und die Gravitation erklärt —, über elektrostatische Erscheinungen, Kohäsion, Elastizität, Lichtausbreitung, Lichtbrechung usw. Aber diese Hypothesen werden mit kategorischen Vorbehalten verbunden, die auf die Mehrdeutigkeit kinetischer Modelle aufmerksam machen. Die angeführten Hypothesen sind keineswegs zwingend, und Newton hatte schon früher darauf verzichtet, sich in eine Polemik über das Hypothesenproblem einzulassen. Die allgemein bekannte Antipathie Newtons gegen eine wissenschaftliche Polemik wird dadurch erklärt, daß gewöhnlich nicht quantitative Proportionen zwischen experimentell gefundenen Größen, sondern kinetische Modelle Diskussionsgegenstand waren. Newton benutzte kinetische Hypothesen, um seine Gedanken anschaulicher und verständlicher zu machen. Er benutzte sie ungern und nur als didaktische Anregungen. Wurden seine Hypothesen angefochten, so hob Newton immer wieder ihren relativen didaktischen, mehrdeutigen Charakter hervor. Newtons Opponenten verwechselten bedingte Hypothesen mit eindeutigen Gesetzen und bezeichneten Newtons Theorien als Hypothesen. Dies wirkte jedesmal auf Newton wie ein rotes Tuch. In einem seiner Briefe an Oldenburg schreibt Newton: „Ich bemerke vor allem, daß meine Lehre über die Brechung des Lichtes und über die Farbe allein in der Feststellung einiger Eigenschaften des Lichtes ohne jede Hypothese über seine Herkunft besteht.

Denn als beste und zuverlässigste Methode bei der Erforschung der Natur dient vor allem die Entdeckung und die experimentelle Feststellung der Eigenschaften der Erscheinungen, und die Hypothesen über ihre Entstehung kann man in den Hintergrund treten lassen. Diese Hypothesen müssen sich der Natur der Erscheinungen unterwerfen und dürfen nicht versuchen, sich diese zu unterwerfen, indem sie die experimentellen Tatsachen unbeachtet lassen. Und wenn jemand eine Hypothese nur deswegen schafft, weil sie möglich ist, begreife ich nicht, wie man in irgendeiner Wissenschaft irgend etwas mit Genauigkeit feststellen kann: Ist es doch möglich, immer neue und neue Hypothesen auszudenken, die neue Schwierigkeiten hervorrufen.“[5]

Dieser Gedanke Newtons birgt einen rationellen Kern. In der Wissenschaft vom 16. bis zum 18. Jahrhundert bekräftigte jeder Schritt nach vorn die Objektivität der wissenschaftlichen Kenntnisse, jeder von ihnen war mit dem Kampf gegen willkürliche Konstruktionen verbunden. Galilei hatte sich gegen die konditionale Auffassung des Heliozentrismus gewandt. Descartes stellte der mittelalterlichen scholastischen Wissenschaftsauffassung seine tiefe Überzeugung von der Objektivität ihrer Wahrheiten entgegen, die keine Vorbehalte über den relativen „Roman der Natur“ verbergen konnten. Aber die cartesische Physik enthielt nicht wenige willkürliche Konstruktionen, nicht wenige Versuche, der Natur apriorische Schemata aufzuzwingen.

Newton stellt eine historisch sehr progressive Forderung auf: Hypothesen müssen der objektiven Wahrheit, den objektiven Tatsachen entsprechen. Hypothesen, die nur deshalb aufgestellt wurden, weil sie möglich sind, sind für ihn

[5] Zit. nach: S. I. Wawilow, Isaac Newton, Berlin 1951, S. 60–61.

eine Quelle der Vieldeutigkeit, Unzulänglichkeit und Unbestimmtheit in der Wissenschaft.

Newtons Ablehnung der Hypothesen war keineswegs so kategorisch, wie es in den „Mathematischen Prinzipien" dargestellt ist. Aber die Relativität des Wortes „hypotheses non fingo" wird nicht einfach durch Berufungen auf Newtonsche Hypothesen bewiesen, sondern durch eine Analyse ihrer Rolle beim Aufbau von Grundbegriffen der klassischen Mechanik. Eine solche Analyse werden wir im folgenden Abschnitt vornehmen. Zunächst wollen wir uns dem Verhältnis Newtons gegenüber abstrakten Kategorien zuwenden.

Newtons Methode und damit die Methode der gesamten Naturwissenschaft im 17. und 18. Jahrhundert läßt sich am Beispiel der Himmelsmechanik verfolgen. Unter dem Gesichtspunkt des Gesetzes der universellen Gravitation ist eine exakte Bestimmung der Bewegung eines Himmelskörpers, zum Beispiel des Mondes, eine unlösbare Aufgabe. In allerdings unterschiedlicher Stärke beeinflussen tatsächlich alle Himmelskörper die Mondbewegung, stehen sie mit ihr durch die Gravitation in Verbindung. Die Wissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts mußte aus den Naturerscheinungen in ihrer unendlichen und universellen Abhängigkeit einzelne Zusammenhänge, einzelne Erscheinungsreihen, einzelne Probleme auswählen. Somit war die Zergliederung der Natur ein notwendiges Element, eine gesetzmäßige Stufe auf der Erkenntniskurve. In der Himmelsmechanik mußte man aus dem universellen Zusammenhang der wechselwirkenden Körper zwei Körper auswählen. So wird das erste Glied der Himmelsmechanik aufgebaut — das von Newton entdeckte Gesetz zweier gegeneinander gravitierender Körper.

Bedeutend schwieriger ist dieses Problem für drei Körper. Auf den Mond angewandt, besagt es, daß außer der Erdanziehungskraft auch die Anziehungskraft der Sonne untersucht werden muß. Das Problem dreier Körper wurde von Newton gestellt, aber es hat bis auf unsere Zeit noch keine vollständige Lösung gefunden. Für die Mondbewegung gibt Newton eine Näherungslösung. Später wurde der Übergang vom abstrakten Schema zweier wechselwirkender Körper zur Gravitation dreier Körper zur Grundlage der im 18. Jahrhundert ausgearbeiteten Störungstheorie. Ohne diese gesetzmäßigen Stufen der abstrakten Analyse hätte die Wissenschaft nicht bis zu den heutigen Vorstellungen vom Weltall kommen können. Aber diese Herauslösung isolierter Probleme aus dem universellen Zusammenhang der Erscheinungen konnte nur ein spezielles Moment, nur eine Stufe beim Studium der Natur sein. Bei Newton, bei seinen Schülern und in der ganzen Naturwissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts bestand allerdings die Tendenz, diese abstrakten Vorstellungen zu verabsolutieren.

2. Newtons Lehre vom Äther und vom Stoff

Von der allgemeinen Geschichte der Naturwissenschaft aus gesehen, hat Newtons Optik erstrangige Bedeutung. Wir finden, daß ihre tiefsten physikalischen Wurzeln häufig kinetisch und manchmal geradezu cartesianisch sind.

Ausgangspunkt der optischen Experimente Newtons waren die Erfordernisse der Praxis. Die Konstrukteure der ersten großen Teleskope stießen auf die sogenannte sphärische Aberration; sie besagt, daß Strahlen von einem Lichtpunkt, die durch sphärische Linsen von endlicher Dicke gehen, sich nicht wieder in einem Punkt treffen, sondern daß ihre Schnittpunkte eine Fläche bilden. Newton untersuchte die Lichtbrechung in Refraktoren und entdeckte dabei die chromatische Aberration. Sie besteht darin, daß die Strahlen verschiedener Farben sich in unterschiedlichen Brennpunkten hinter dem Objektiv des Refraktors sammeln. Im 17. Jahrhundert verwendete man Refraktoren bis zu 150 Fuß Länge. Dabei konnte sich der Fokus der violetten Strahlen von dem der roten Strahlen um Zehntel Teile eines Zolls entfernen. Um einer solchen Aberration zu entgehen, schlug Newton vor, die Refraktoren durch Spiegelteleskope, durch Reflektoren, zu ersetzen.

Nach dem Bau des Spiegelteleskops legte Newton eine seiner größten Entdeckungen vor. Unter dem Titel „Eine neue Theorie des Lichts und der Farben" übermittelte er 1672 der Royal Society eine neue Schrift. Sie war das Ergebnis bedeutender optischer Experimente. Das Experiment wurde mit Newton zu einem so exakten und fruchtbringenden Erkenntnismittel, daß die gesamte voraufgegangene Experimentalgeschichte eine Vorgeschichte der Newtonschen Arbeiten zu sein schien.

Newton zerlegte einen Sonnenstrahl durch ein Glasprisma. Er ließ einen Strahl durch eine schmale Öffnung in ein dunkles Zimmer fallen. Der Strahl fiel auf ein Prisma, hinter dem eine Leinwand stand. Newton untersuchte nun das sich auf der Leinwand abzeichnende Spektrum und konstatierte, daß das weiße Licht aus farbigen Strahlen besteht, die vom Prisma im unterschiedlichen Grade abgelenkt werden. Newton maß die Brechung der verschiedenen Bereiche des Spektrums. Zu diesem Zweck ließ er durch eine Öffnung in der Leinwand Strahlen der einen Lichtart hindurchgehen und auf ein weiteres Prisma fallen. Er fand, daß das rote Licht den geringsten Brechungsgrad aufweist, daß dieser zum violetten Ende des Spektrums hin wächst.

Newton zog aus seinen Experimenten wichtige Schlußfolgerungen: Die Farbe ist eine ursprüngliche Eigenschaft des Lichtes. Sie wird nicht durch die Eigenschaften der Körper hervorgerufen, die die Lichtstrahlen brechen oder widerspiegeln. Einige Strahlen vermögen nur die Empfindung einer roten Farbe zu erzeugen, andere nur die einer gelben. Einem gegebenen Brechungsgrad eines Strahles entspricht eine bestimmte Farbe, und umgekehrt kann jede Farbe nur durch Strahlen mit einem ganz bestimmten Brechungsgrad hervorgebracht werden.

Farbe und Brechungsgrad einer bestimmten Art von Strahlen sind weder durch Brechung, durch Reflexion, noch durch irgendeine andere Ursache abzuändern. Newton berichtet, er habe monochromatische Strahlen durch ein Prisma gebrochen, durch gefärbte Medien und durch Medien gehen lassen, die mit anderen Strahlen durchleuchtet waren, habe aber niemals das Auftreten einer anderen Farbe oder eines anderen Brechungsgrades beobachtet. Bei der Mischung von Strahlen verschiedener Art entsteht eine scheinbare Veränderung der Farbe,

es entstehen neue Farben, die dem Gemisch eigen sind. Bei der Trennung der verschiedenen Strahlen des Spektrums voneinander treten ihre Farben wieder hervor. Sie sind aber nicht neu erzeugt, sondern werden nur durch die Trennung wieder sichtbar gemacht. Neue Farben, die bei der Mischung und Trennung der Lichtstrahlen hervortreten, sind nicht als wirkliche Umwandlungen anzusehen.

Dementsprechend unterscheidet Newton ursprüngliche und zusammengesetzte, sekundäre Farben. Die ursprünglichen Farben besitzen ein Spektrum, das sich aus Rot, Gelb, Grün, Blau oder Violettpurpur sowie Orange, Indigo und einer Mannigfaltigkeit von dazwischenliegenden Schattierungen zusammensetzt.

Die gleichen Farben können auch durch Mischung hervorgebracht werden, denn eine Mischung von Gelb und Blau ergibt Grün, von Rot und Gelb Orange, von Orange und gelblichem Grün Gelb. Nur diejenigen Farben, welche im Spektrum zu weit voneinder entfernt sind, ergeben keine Zwischenfarben.

Die weiße Farbe erhält man durch Vereinigung aller oben genannten Farben. Newton berichtet, wie er die weiße Farbe gewann, indem er durch ein Prisma voneinander getrennte Strahlen wieder mischte. Dieses weiße Licht unterschied sich vom direkten Sonnenlicht nur dann merklich, wenn die gebrauchten Gläser nicht ganz rein und farbenfrei waren.

Hieraus ergibt sich, daß Weiß die gewöhnliche Farbe des Lichtes ist. Die weiße Farbe ist ein Gemisch von Strahlen aller Arten, das von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird. Einige Körper senden freilich die Strahlen nicht in gleicher Proportion aus. Ihr Licht erscheint dann farbig.

Diese Auffassungen erklären eindeutig die Entstehung des Lichtspektrums beim Durchgang des Lichtes durch ein Prisma. Die Strahlen werden unterschiedlich gebrochen, die weiße Farbe wird in ihre Bestandteile zerlegt. Auf diese Weise wird auch verständlich, wie die Farben des Regenbogens in den fallenden Tropfen erscheinen.

Newton erklärt auch die unterschiedliche Färbung mancher Körper bei Veränderung ihrer Lage. Manche Körper reflektieren eine bestimmte Art von Licht und absorbieren eine andere.

Newton erklärt mit der Zerlegung des Lichtes eine von Robert Hooke entdeckte Erscheinung. Er schreibt: „Wenn man zwei durchsichtige Gläser mit zwei durchsichtigen Flüssigkeiten, das eine mit einer blauen, das andere mit einer roten füllt, so erscheinen sie beide hintereinandergesetzt vollkommen undurchsichtig. Weil nämlich das eine Gefäß nur rote, das andere nur blaue Strahlen durchläßt, so können durch beide hindurch überhaupt keine Strahlen gehen.“[6]

Nach Newtons Theorie werden die unterschiedlichen Farben der Körper durch deren unterschiedliche Fähigkeit erklärt, bestimmte Lichtstrahlen stärker als andere zu reflektieren.

Newton schließt die Darlegung seiner Theorie mit einem Hinweis auf die Substantialität des Lichtes: „Da wir nun den Grund der Farben nicht in den Körpern, sondern im Licht gefunden haben, so haben wir guten Grund, dieses als Substanz zu bezeichnen ...“[7]

[6] Ebenda, S. 41.
[7] Ebenda, S. 42.

Schon hier sieht Newton davon ab, physikalische Hypothesen aufzustellen. „Aber vollständig und im einzelnen zu bestimmen, was das Licht ist, auf welche Weise es gebrochen wird und auf welche Art oder durch welche Aktion es in unserem Geiste die Empfindung der Farben hervorbringt, das ist nicht so leicht: und ich will hier nicht Konjekturen (Vermutungen — *die Hrsg.*) mit Gewißheiten zusammenmischen.“[8]

Der Schlußsatz dieses Zitates ist die erste Variante des „hypotheses non fingo“, mit dem die „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“ abgeschlossen werden. In der „Neuen Theorie des Lichts und der Farben“ erfolgt die Ablehnung der Hypothesen in verhältnismäßig milder Form. Die eindeutige, vollständige, ganz unbestreitbare Theorie des Lichtes konnte man mit großer Mühe als anschauliche physikalische Theorie erhalten. Aber Newton strebte nach absoluter Zuverlässigkeit. Er verbannte die kinetischen Hypothesen nicht aus der Physik, sprach aber schon von einer strikten Abgrenzung der Physik der Prinzipien von der Physik der Modelle.

Newtons Lichttheorie geht von der Existenz sehr kleiner Korpuskeln aus, die auf der Netzhaut die Lichtempfindung hervorrufen. Die größten Teilchen rufen rotes, die kleinsten violettes Licht hervor. Die Gesetze der Optik werden aus den Wechselwirkungen zwischen Materieteilchen und Lichtkorpuskeln abgeleitet. Beim Übergang von einem Medium in ein anderes werden die Teilchen infolge der Anziehungskraft abgelenkt, die sehr kleinen violetten am meisten, die sehr großen roten Teilchen am wenigsten.

Übrigens hat Newton im Verlauf seines Lebens verschiedene Hypothesen über das Licht geäußert, unter anderem hat er das Licht als Ätherschwingungen aufgefaßt.

Im Jahre 1672 äußerte Robert Hooke eine Reihe von kritischen Bemerkungen zur gerade erst erschienenen „Neuen Theorie des Lichts und der Farben“. Newton antwortete mit einer kleinen Schrift, in der er die Wellentheorie des Lichts der Emissionstheorie der Lichtteilchen gegenüberstellte. In seiner Polemik mit Hooke gab Newton eine Skizze eines Kompromisses, der die Vorzüge der Korpuskular- und der Wellenhypothese verbindet. Vor allem verweist er darauf, daß dieEmissionstheorie in keinem Falle eindeutig mit den von ihm gefundenen Gesetzen der Lichtausbreitung, Brechung und Reflexion verbunden werden kann. Aber selbst diese Theorie, deren Schicksal durchaus nicht mit dem der eindeutigen und zuverlässigen optischen Gesetze zusammenhängt, schließt keineswegs die Wellenhypothesen aus. Nach Newton sind die Schwingungen des Äthers notwendig, um die optischen Erscheinungen selbst bei Annahme von Lichtkorpuskeln zu erklären. Indem die Lichtkorpuskeln auf reflektierende Oberflächen fallen, erzeugen sie im Äther ebenso unvermeidliche Schwingungen wie ein ins Wasser geworfener Stein. Die Ätherwellen können von unterschiedlicher Länge sein und somit viele optische Erscheinungen erklären.

Newton hat seine Hypothese von der Emission der Teilchen, die im Äther Wellen erzeugen, später weiterentwickelt. In seinem oben erwähnten Aufsatz

[8] Ebenda.

vom Jahre 1675 sagt er, daß im luftleeren Raum ein materielles Medium, der Äther, zurückbleibt, der außerordentlich fein, elastisch und dünn ist. Der Äther erklärt die vielfältigen physikalischen Erscheinungen wie den Magnetismus, die Elektrizität und sogar die Schwerkraft. Newton beschreibt ganz im Sinne Descartes' verschiedene sehr feine Fluida, aus denen der Äther besteht.

Die elektrische Anziehung und Abstoßung wird durch die Ausscheidung des feinen Fluidums bei der Reibung erklärt. Das genannte Fluidum, das sich um ein gerieftes Glas ausbreitet, zirkuliert in verschiedenen Richtungen, reißt leichte Körper mit sich, kehrt schließlich in das Glas zurück und verdichtet sich hier. Die Gravitation wird durch die Bewegung einer anderen Komponente des Äthers erklärt. Das Gravitationsfluidum fließt zur Oberfläche der Poren des Stoffes. Die Erde saugt den Äther auf und verdichtet ihn in ihren Poren. Daher strebt der Äther zur Erde und zieht den Körper mit sich. Er drückt auf diesen Körper proportional zur Oberfläche der Teilchen. Im Innern der Erde kommt es zu komplizierten Reaktionen, die den Äther in einen gewöhnlichen Stoff umwandeln und wiederum aus anderen Stoffen Äther herstellen. Die Ausbreitung des Lichts steht mit den Schwingungen des Äthers in Zusammenhang. Newton behauptet, daß die Wellen des Äthers eine geringere Größe haben als ein Hunderttausendstel Zoll ($2{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm). Der Äther durchdringt den Körper, so daß seine Dichte innerhalb der Körper geringer ist als an der Oberfläche. Das Licht erwärmt den Äther in den Körpern, der Äther übt einen Druck auf das Licht aus, und die Lichtstrahlen weichen vor dem dichten zum dünneren Äther zurück. Dadurch werden die Lichtbrechung und die totale Reflexion beim Übergang aus einem weniger dichten in ein dichteres Medium verdeutlicht. Mit ähnlichen hypothetischen Modellen erklärt Newton die gewöhnliche Reflexion des Lichtes, die Farben dünner Schichten usw. Die Ätherschwingungen unterstützen die Bewegung der Teilchen bei der Gärung, beim Faulen und bei der Verbrennung der Stoffe. Wenn der Mensch seine Muskeln zusammenballt, so preßt er den sie durchdringenden Äther zusammen. In diesem Prozeß ist noch eine Ingredienz des Äthers beteiligt, das „tierische Fluidum“.

Je tiefer Newton seine Hypothese der universellen Gravitation ausarbeitete, desto weniger entsprachen die willkürlichen Äthermodelle seinem wissenschaftlichen Anliegen. Die optischen Gesetze werden aus dynamischen Begriffen abgeleitet. In der ersten Ausgabe der „Mathematischen Prinzipien“ wird der Äther kaum erwähnt. In der zweiten Ausgabe wird er lediglich als eine hypothetische Konstruktion dargelegt, die die Kohäsion, die elektrischen Erscheinungen, die Lichtbrechung und -reflexion sowie physiologische Reflexe zu erklären vermag. Im Jahre 1705 gab Newton der lateinischen Übersetzung der „Optik“ einen ergänzenden Paragraphen bei, der die Widerlegung der Wellentheorie des Lichtes und der Hypothese des den Raum zwischen den Sternen anfüllenden Äthers zum Gegenstand hatte. Newton wendet sich besonders entschieden gegen die Vorstellung, der materielle Äther sei Ursache der Gravitation. Nach Newtons Meinung muß sich die Wissenschaft induktiv gefundener Gesetze bedienen, die letzten Endes zur Bestimmung der Ursachen führen. Nach seinen Worten ist es das ent-

scheidende Spezifikum der Naturphilosophie, aus Erscheinungen Schlußfolgerungen zu ziehen, ohne Hypothesen zu benutzen, und das so lange zu tun, bis wir zur ersten Ursache kommen, die natürlich nicht mechanisch ist. Diese erste Ursache ist Gott. S. I. Vavilov zitiert einen Abschnitt aus den Aufzeichnungen D. Gregorys, in denen ein Gespräch mit Newton aus dem Jahre 1705 geschildert wird, also aus dem Jahr, da Newton die erwähnte Ergänzung zur lateinischen Ausgabe seiner „Optik" schrieb.

„Sir Isaac Newton weilte bei mir und sagte, er habe seinem Buch über das Licht und die Farben in der neuen lateinischen Ausgabe sieben Seiten hinzugefügt ... Er hatte Zweifel, ob er folgende Frage so ausdrücken könne: ‚Womit ist der Raum angefüllt, wenn er frei von Körpern ist?' Die volle Wahrheit ist, daß er an die allgegenwärtige Gottheit im wahren Sinne des Wortes glaubt. Genau so wie wir die Gegenstände wahrnehmen, wenn ihre Bilder ins Hirn gelangen, so muß auch Gott jedes Ding empfinden, da es immer bei ihm ist. Er nimmt an, Gott sei sowohl in dem von Körpern freien Raum als auch dort anwesend, wo es Körper gibt. Aber da er der Meinung ist, eine solche Formulierung sei zu plump, will er so schreiben: ‚Welche Ursache schrieben die Alten der Gravitation zu?' Er glaubt, daß die Alten Gott und nicht irgendeinen Körper als Ursache ansahen, denn jeder Körper ist bereits an und für sich schwer."[9]

In der zweiten englischen Ausgabe seiner „Optik" vom Jahre 1717 spricht Newton erneut von der physikalischen Substanz, die den ganzen Raum ausfüllt. Es ist jedoch kennzeichnend, daß in dieser Ausgabe neben ergänzenden Paragraphen, in denen Newton die Existenz des Äthers zugesteht, auch Abschnitte zu finden sind, die schon in der ersten Ausgabe (1704) enthalten waren und die Existenz des Äthers bestreiten. In der dritten und vierten englischen Ausgabe der „Optik" (1721–1730), die noch von Newton selbst redigiert worden sind, finden sich vorrangig Paragraphen aus der Ausgabe von 1704, in denen die optischen Gesetze ohne Ätherhypothesen abgeleitet werden. Dann folgen Abschnitte, die die Existenz des Äthers erneut bestreiten, und schließlich wird die Optik unter dynamischen Gesichtspunkten behandelt.

Offenbar fühlte Newton während seines ganzen Lebens, daß man sich Licht, Elektrizität und Gravitation ohne kinetische Äthermodelle nicht anschaulich vorstellen kann. Gleichzeitig hütete er sich aber davor, mit der Ätherhypothese seine mechanischen und optischen Gesetze zu verbinden, die unbestreitbar und unmittelbar aus der reinen Erfahrung abgeleitet waren. Die „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" enden mit folgendem Absatz: „Es würde hier der Ort sein, etwas über die geistige Substanz hinzuzufügen, welche alle festen Körper durchdringt und in ihnen enthalten ist. Durch die Kraft und Tätigkeit dieser geistigen Substanz ziehen sich die Teilchen der Körper wechselseitig in den kleinsten Entfernungen an und haften aneinander, wenn sie sich berühren. Durch sie wirken die elektrischen Körper in den größten Entfernungen, sowohl um die nächsten Körperchen anzuziehen, als auch um sie abzustoßen. Mittels dieses geistigen Wesens strömt das Licht aus, wird zurückgeworfen, gebeugt, gebrochen

[9] Ebenda, S. 134–135.

und erwärmt die Körper. Alle Gefühle werden erregt und die Glieder der Tiere nach Belieben bewegt, durch die Vibrationen desselben, welche sich von den äußeren Organen der Sinne mittels der festen Fäden der Nerven bis zum Gehirn und hierauf von diesem zu den Muskeln fortpflanzen. Diese Dinge lassen sich aber nicht mit wenigen Worten erklären, und man hat noch keine hinreichende Anzahl von Versuchen, um genau die Gesetze bestimmen und beweisen zu können, nach welchen diese allgemeine geistige Substanz wirkt."[10]

Dieser Absatz folgt der Deklaration „hypotheses non fingo". Und unmittelbar nach dieser Deklaration entwickelt Newton eine Reihe von physikalischen Hypothesen — übrigens ganz im Geiste des Cartesianismus. Danach erklärt der Äther die Kohäsion, elektrische, magnetische, optische und physiologische Erscheinungen bis hin zu den physiologischen Reflexen. Aber Newton entwickelt im Unterschied zu Descartes keine Hypothese über den Äther, weil er keine Möglichkeit sieht, exakte Gesetze für die Wirkungen des Äthers zu formulieren. Hypothesen sind von wissenschaftlichem Wert, wenn von ihnen ausgehend neue Gesetze formuliert werden können, die mit den durch das Experiment gewonnenen Größen übereinstimmen. Man darf allerdings nicht glauben, daß eine solche rationale Beziehung zu den Hypothesen in Newtons Weltanschauung in so einfacher Form Eingang fand. Newton war lediglich von der Exaktheit der Gesetze fest überzeugt. Hypothesen und Modellen maß er bisweilen eine rein didaktische Rolle bei, manchmal neigte er dazu, den Äther physikalisch aufzufassen, in anderen Fällen schrieb er die Ausbreitung des Lichtes und der Gravitation einem nichtmateriellen Agens zu. Newtons Verhältnis zum Problem des Äthers und der Leere war also sehr widersprüchlich.

Die Idee des leeren Raumes nahm in Newtons Physik und in den physikalischen Voraussetzungen seiner Mechanik einen wichtigeren Platz als der entgegengesetzte Gedanke von einem die Wechselwirkung der Körper vermittelnden materiellen Medium ein. Dafür waren verschiedene Motive maßgebend.

Newton geht nur in seiner „Optik" und in seinen experimentellen Untersuchungen so oft auf die Ätherhypothese ein. In seinen mathematischen, mechanischen und astronomischen Untersuchungen wird hingegen der Raum als leer angesehen. Bei den philosophischen und theologischen Arbeiten Newtons geht es um den unmittelbaren Eingriff Gottes in den Ablauf der physikalischen Prozesse. Newtons Schüler gingen noch weiter. Es wäre jedoch falsch, wollte man die theologischen Schlußfolgerungen nur Cotes und anderen Theologen, Schülern und Kommentatoren Newtons zuschreiben.

Mit der Newtonschen Methode verbindet sich die Idee der Fernwirkung. In Newtons Mechanik gewann der Gedanke des wechselseitigen Zusammenhangs der Naturgegenstände die historisch begrenzte abstrakte Form der Wechselwirkung zweier aus dem allgemeinen Zusammenhang herausgenommenen Körper. Die Wirkung der Körper aufeinander verleiht ihnen ihre Beschleunigung. Deshalb werden der der Beschleunigung entgegengesetzte Widerstand — die Masse —

[10] I. Newton, Mathematische Principien der Naturlehre, a. a. O., S. 511f.

und die ihr proportionale Ursache — die Kraft — zu Zentralbegriffen. Der ganze mathematische und mechanische Apparat der „mathematischen Prinzipien“ wird für die Analyse der Gravitationskräfte ohne Untersuchung des Mediums gebraucht.

Das Fernwirkungsprinzip fand zusammen mit Newtons Mechanik in die Naturwissenschaft Eingang. Newton selbst war jedoch kein bedingungsloser Anhänger dieses Prinzips. Nicht selten, vor allem in Briefen, hat er sich gegen die Fernwirkung ausgesprochen. Bekannt geworden ist Newtons dritter Brief an Bentley vom 15. Februar 1693, in dem er in entschiedener Form das Fernwirkungsprinzip verwirft. Er schrieb: „Es ist tatsächlich unbegreiflich, wie unbeseelte, unvernünftige Materie, ohne die Vermittlung von irgend etwas anderem, welches nicht materiell ist, auf andere Materie wirken und auf dieselbe ohne gegenseitige Berührung wirken könnte, wie es geschehen müßte, wenn die Gravitation in dem Sinne von Epikur der Materie wesentlich und inhärent sein sollte. Daß die Gravitation der Materie wesentlich, inhärent und anerschaffen sein sollte, so daß ein Körper auf einen anderen wirken könnte auf die Entfernung hin durch den leeren Raum, ohne die Vermittlung von irgend etwas, durch welches ihre Aktion und ihre Kraft von einem zum anderen geleitet werden könnte, das ist nach meinem Dafürhalten eine so große Absurdität, daß ich glaube, kein Mensch, welcher in philosophischen Dingen eine genügende Denkfähigkeit hat, kann jemals darauf verfallen. Die Gravitation muß durch ein Agens, welches konstant nach gewissen Gesetzen wirkt, verursacht sein ...“[11]

Gegner der Fernwirkungsidee haben sich auf diesen Brief berufen und Newton den Gedanken eines materiellen Mediums zugeschrieben, das Ursache der Gravitation ist. So verfuhren Faraday, Maxwell, Thomson und viele andere. Aber der oben abgebrochene Satz wird bei Newton mit der Wendung fortgesetzt: „Ob aber dieses Agens materiell oder immateriell ist, habe ich der Überlegung der Leser überlassen.“[12] Faraday läßt diese Worte Newtons bei Darlegung von dessen Auffassungen „als unverständlich“ beiseite. Ohne eine historische Analyse der verschiedenen theoretischen Quellen in Newtons Schaffen, der verschiedenen Einflüsse, widersprüchlichen Ideen und seiner eigenen Schwankungen zwischen den beiden einander ausschließenden Konzeptionen sind sie es tatsächlich.

Wie wir sehen, kommt Newton über komplizierte und oft widersprüchliche Auffassungen vom Äther und von der Leere schließlich zur Ausklammerung des Äthers aus seinem wissenschaftlichen Weltbild. Der Äther figuriert als didaktische Hypothese, die Leere ist mit einem Agens gefüllt, das dem Äther ähnlich, noch öfter aber eine inmaterielle Substanz ist. Wo aber Gesetze herrschen, gibt es nur den Gegensatz zwischen Leere und sich in ihr bewegenden materiellen Körpern. Bei Descartes wies das Weltbild keinerlei qualitative Unterschiede auf. Newton nimmt *eine*, aber eben *nur eine* Unterscheidung vor: die Unterscheidung von Raum und Materie.

[11] Zit. nach: S. I. Wawilow, Isaac Newton, a. a. O., S. 134.
[12] Ebenda.

Die ursprünglichen Auffassungen Newtons von der Struktur des Stoffes und der Natur der chemischen Reaktionen wären als ätherisch-kinetisch zu bezeichnen. Dagegen sind die Auffassungen der späteren Zeit dynamisch. Sie sind auf der Vorstellung der durch die Leere wirkenden Gravitation gegründet.

Diese Schwankungen und Widersprüche in der Auffassung des Äthers lassen sich nicht mit der Art und Weise vereinbaren, wie Newton Naturgesetze in endgültiger Form fixierte und die „Prinzipien" als gleichsam neue Gesetzestafeln postulierte. Newton blieb im Bewußtsein der Wissenschaftler vornehmlich als Verfasser der „Prinzipien der Naturphilosophie", bis die Physik des 20. Jahrhunderts dem Newtonschen System seine absolute Unfehlbarkeit aberkannte und sie auf die Stufe einer Approximation stellte. Aber erst heute vermag man den „nichtklassischen" Newton umfassend einzuschätzen: Die Generation, die durch den Schmelztiegel der Verallgemeinerungen der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik gegangen ist, betrachtet den unexakten, oft intuitiven Kontext und die widersprüchlichen physikalischen Ausgangspunkte der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" mit größerem Interesse und größerem Verständnis als zuvor.

3. Raum und Bewegung bei Newton

Ausgangsdefinition der „Mathematischen Prinzipien" ist die Bestimmung der Masse als Maß der Materie. „*Die Größe der Materie ist durch ihre Dichtigkeit und ihr Volumen vereint gemessen.*"[13]

Der Begriff der Masse hätte weder der Mechanik, der Physik noch der Chemie zugrunde gelegt werden können, wenn er nicht quantitativ bestimmt worden, dem Gewicht proportional gewesen wäre. „Diese Größe der Materie werde ich im folgenden unter dem Namen *Körper* oder *Masse* verstehen, und sie wird durch das Gewicht des jedesmaligen Körpers bekannt. Daß die Masse dem Gewichte proportional sei, habe ich durch sehr genau angestellte Pendelversuche gefunden, wie später gezeigt werden wird."[14]

Die Feststellung der Proportionalität von Masse und Gewicht ist von historischer Bedeutung. Sie war und ist Grundlage der Gravitationstheorie. Physik und Chemie erhielten durch diese Bestimmung ebenfalls eine Grundlage für die weitere Entwicklung. Da das Gewicht der Masse proportional ist, ergaben sich umfassende Möglichkeiten für quantitative Experimente. Des weiteren eröffnete die quantitative Bestimmtheit aller mit dem Gewicht verbundenen Begriffe den Weg zur positiven mathematischen Ausarbeitung der experimentellen Naturwissenschaft. Schließlich ist in einem Weltbild, in dem Materie durch die Masse gemessen wird und das Gewicht der Masse proportional ist, für gewichtslose Fluida kein Platz mehr. Sie erweisen sich für die Naturwissenschaften, die sich auf der Grundlage der Newtonschen Mechanik entwickeln, als Fremdbegriffe.

[13] I. Newton, Mathematische Principien der Naturlehre, a. a. O., S. 21.
[14] Ebenda.

Somit sind schon in der ersten Definition der „Mathematischen Prinzipien" einige Wesenszüge der Naturwissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts enthalten. Gleichzeitig verallgemeinerte und systematisierte Newtons Definition einige Tendenzen, die bereits in der Naturwissenschaft des 17. Jahrhunderts angedeutet worden waren. Es sei nur daran erinnert, daß am Anfang dieses Jahrhunderts von Galilei Experimente durchgeführt worden waren, aus denen sich die Proportionalität von Masse und Gewicht ergab.

Als nächstes gab Newton eine quantitative Bestimmung der Bewegung. „*Die Größe der Bewegung wird durch die Geschwindigkeit und die Größe der Materie vereint gemessen.*"[15] Gerade die quantitative Seite ist auch für Newton interessant. Die Bewegung ist für ihn von vornherein eine Größe, die der Messung unterliegt. In der Definition fungiert sie sofort als Quantität: Die Bewegung des Ganzen ist die Summe der Bewegung der einzelnen Teile. Historisch gesehen schließt sich dieser Begriff an die cartesische Auffassung vom Maß der Bewegung an.

Newtons dritte Definition besagt: „*Die Materie besitzt das Vermögen, zu widerstehen; deshalb verharrt jeder Körper, soweit es an ihm ist, in einem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung.*"[16]

Es ist zu betonen, daß diese Formulierung durchaus nicht mit dem Inertialprinzip, speziell mit dem ersten Newtonschen Bewegungsgesetz, identisch ist. Hier ist nicht von der Bewegung, sondern von der Materie die Rede, von ihrem Wesen und ihrer integrierenden dynamischen Eigenschaft. Die Trägheit im Sinne der Erhaltung der Geschwindigkeit der geradlinigen gleichförmigen Bewegung war schon vor Newton ziemlich klar formuliert worden. Hier wird aber ein anderes Problem hervorgehoben: Die Fähigkeit zu widerstehen ist eine ursprüngliche Eigenschaft des Körpers, um seinen Zustand zu erhalten. Diese ursprüngliche Trägheit war eine negative Bestimmung der Bewegung (der geradlinigen und der gleichförmigen Bewegung an sich wird damit nicht Einhalt geboten); bei Huygens und vor allem bei Leibniz wurde sie dann zu einer positiven Bestimmung der Materie (der Materie ist ihrer Natur nach ein aktiver Widerstand gegen einen Stoß eigen, die aktive Kraft der Materie ermöglicht es einem Körper, auf einen anderen einzuwirken). Newton entwickelt diese dynamische Konzeption, die sich von der Descartes' unterscheidet, und betont durch seine Terminologie besonders, daß jeder Körper von seinem Zustande nur schwer abgebracht werden kann („perseverare in statu quo").[17]

Es werden weiter Definitionen gegeben, die sich auf den Begriff der Kraft beziehen. Darauf folgt eine Anmerkung, in der es Newton für unumgänglich hält, den Begriff des absoluten Raumes einzuführen.

Newton definiert: „Der *absolute* Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich. Der *relative Raum* ist ein Maß oder ein beweglicher Teil des ersteren, welcher von

[15] Ebenda.
[16] Ebenda.
[17] Ebenda.

unsern Sinnen, durch seine Lage gegen andere Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbewegten Raum genommen wird."[18]

Der Teil des Raumes, der von einem Körper ausgefüllt ist, wird als Ort dieses Körpers bezeichnet. In Abhängigkeit von der Art des Raumes unterscheidet man absolute und relative Orte des Körpers.

Die absolute Bewegung wird als Verschiebung eines Körpers von einem absoluten Orte zu einem anderen absoluten definiert, die relative Bewegung als die Verschiebung eines Körpers von einem relativen Orte zu einem anderen. Somit ist die absolute Bewegung die Bewegung im absoluten, die relative Bewegung die im relativen Raum.

Newton führt das Beispiel eines segelnden Schiffes an. Der relative Ort der Ladung ist der Schiffsteil, in dem sie verstaut ist. Wenn die Ladung auf dem Schiff ihren Ort nicht verändert, so sagen wir, daß sie sich in relativer Ruhe befindet. „*Wahre* Ruhe hingegen ist das Verharren des Körpers in demselben Teile jenes unbewegten Raumes, in welchem das Schiff selbst mit seinem hohlen Raume und all seinem Inhalt sich bewegt."[19]

Nach Newton gibt es in der Natur überhaupt keine gleichförmige Bewegung, die als natürliches Maß der absoluten Zeitrichtung dienen könnte. Die absolute Zeit bewegt sich unabhängig von den Naturprozessen. Die absolute Zeit der Existenz eines Gegenstandes ändert sich nicht in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit seiner Bewegungen. Die relative Zeit, die Gegenstand der Beobachtung ist, ist im Gegensatz dazu von der Geschwindigkeit der realen Prozesse abhängig. Daher unterscheidet sich nach Newton die wahre Dauer von der unmittelbar beobachteten.

Newton beweist, daß die unmittelbare Beobachtung unter keinen Umständen den Unterschied zwischen den einzelnen Teilen des absoluten Raumes und der absoluten Zeit festzustellen vermag. Nur der relative Ort der Gegenstände ist für die Sinne erfaßbar, d. h. ihre Entfernung von anderen, als unbeweglich angesehenen Körpern. Dessenungeachtet führt Newton ein nach seiner Meinung überzeugendes dynamisches Kriterium für die Abgrenzung von absoluter und relativer Bewegung an.

Der Begriff des absoluten Raumes, der bei Aristoteles eine Rolle spielt, wird in der Mechanik nicht mehr verwandt. Newton vollendet die von Kopernikus und Galilei begonnene Zerstörung des aristotelischen Systems der natürlichen Örter, auf die sich der absolute Raum gründete. Dieser Begriff verliert nunmehr seinen unmittelbaren, anschaulichen, kinetischen Sinn. Man kann nicht den „absoluten Ort", d. h. den Ort des Körpers im absoluten Raum, nach seiner Lage in bezug auf die absolut unbewegliche Erde bestimmen. Es ist schon unmöglich, die absolute Bewegung durch den absoluten Raum zu bestimmen. Jetzt gewinnt im Gegensatz dazu der Begriff „absoluter Raum" nur insoweit Sinn, wie Beobachtungen die absolute Bewegung registrieren können. Die absolute Bewegung wird von Newton durch das Auftreten von Inertialkräften bei der Beschleunigung

[18] Ebenda, S. 25f.
[19] Ebenda, S. 26.

erklärt. So wird anstelle eines absolut unbeweglichen Bezugskörpers, anstelle eines kinematisch anschaulichen absoluten Raumes von Newton ein lokales Kriterium eingeführt: das Verhalten eines beschleunigten Körpers in einem gegebenen Punkt unterscheidet sich vom Verhalten eines ruhenden oder sich gleichförmig bewegenden Körpers.

Dieses neue Kriterium war nicht nur eine neue Konzeption eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit, sondern auch die erste quantitativ bestimmte Form der *differentialen Weltauffassung*, die wir bereits bei Darlegung der Auffassungen Galileis von den kreisförmigen Inertialbewegungen erwähnten. Es sei nochmals daran erinnert, daß bei Aristoteles letzlich nicht die Körperbewegungen an sich das Schema der Weltharmonie schufen. Sie wurden durch das Wirken eines Impetus hervorgerufen, ohne den sie aufhören würden. Galilei ging vom Schema einer geordneten Welt aus, vom kinematischen Schema der Bewegung sich selbst überlassener Kräfte. Sie schaffen auch das „verweilende Sein", die Veränderung in der Welt weist jedoch Beschleunigungen auf. Bei Aristoteles werden die Veränderungen in der Natur durch Abweichungen hervorgerufen, oder sie bestehen in Abweichungen vom integralen statischen Weltschema, von der geordneten Verteilung der Körper, bei der sie sich an ihren natürlichen Orten befinden. Weder bei Galilei noch in der rein quantitativen Form bei Newton ist es nötig, sich bei der Bestimmung der Veränderungen auf das integrale Weltschema zu berufen. Die Veränderungen äußern sich im Punkt und im Augenblick in lokaler Weise. Deshalb besteht die Bahn des Körpers nicht nur geometrisch, sondern auch physikalisch aus einzelnen Punkten und die Zeitspanne der Bewegung aus einzelnen Augenblicken. Wir können die Bewegung durch solche mathematische Verfahren beschreiben, die es im Prinzip ermöglichen, die Bewegung der Teilchen von Punkt zu Punkt und von Augenblick zu Augenblick zu verfolgen. Hier liegt der Ausgangspunkt für die Vorstellung, daß sich die Naturprozesse mit Differentialgleichungen beschreiben lassen.

Der lokale Charakter der Beschleunigung ermöglicht es, sie als absolut anzusehen. In einem sich beschleunigt bewegenden System entstehen Kräfte. Bewegen sich andere Körper in bezug auf einen gegebenen Körper beschleunigt, so entstehen in ihm keine Kräfte. Deshalb verlangt die Konstatierung einer Beschleunigung keinen Bezugskörper. Die Beschleunigung ist absolut. Wenn aber der Übergang eines Körpers von einem Ort zu einem anderen bei beschleunigter Bewegung absolut ist, so müssen die Örter Teile des absoluten Raumes sein.

„*Die wirkenden Ursachen*, durch welche absolute und relative Bewegungen von einander verschieden sind, sind die *Fliehkräfte* von der Achse der Bewegung. Bei einer nur relativen Kreisbewegung existieren diese Kräfte nicht, aber sie sind kleiner oder größer je nach Verhältnis der Größe der Bewegung."[20]

Newton führt weiter das bekannte Beispiel eines sich drehenden Wassereimers an.

„Man hänge zum Beispiel ein Gefäß an einem sehr langen Faden auf, drehe dasselbe beständig im Kreise herum, bis der Faden durch die Drehung sehr steif

[20] Ebenda, S. 29.

wird; hierauf fülle man es mit Wasser und halte es zugleich mit dem letzteren in Ruhe. Wird es nun durch eine plötzlich wirkende Kraft in entgegengesetzte Kreisbewegungen versetzt und hält diese, während sich der Faden ablöst, längere Zeit an, so wird die Oberfläche des Wassers anfangs eben sein, wie vor der Bewegung des Gefäßes, hierauf, wenn die Kraft allmählich auf das Wasser einwirkt, bewirkt das Gefäß, daß dieses (das Wasser) merklich sich umzudrehen anfängt. Es entfernt sich nach und nach von der Mitte und steigt an den Wänden des Gefäßes in die Höhe, indem es eine hohle Form annimmt (diesen Versuch habe ich selbst gemacht). Durch eine immer stärkere Bewegung steigt es mehr und mehr an, bis es in gleichen Zeiträumen mit dem Gefäße sich umdreht und relativ in demselben ruhet. Dieses Ansteigen deutet auf ein Bestreben, sich von der Achse der Bewegung zu entfernen, und durch einen solchen Versuch wird die wahre und absolute kreisförmige Bewegung des Wassers, welche der *relativen* hier ganz entgegengesetzt ist, erkannt und gemessen. Im Anfange, als die *relative* Bewegung des Wassers im Gefäße am größten war, verursachte dieselbe kein Bestreben, sich von der Achse zu entfernen. Das Wasser suchte nicht, sich dem Umfange zu nähern, indem es an den Wänden emporstieg, sondern blieb eben und die *wahre* kreisförmige Bewegung hatte daher noch nicht begonnen. Nachher aber, als die relative Bewegung des Wassers abnahm, deutete sein Aufsteigen an den Wänden des Gefäßes das Bestreben an, von der Achse zurückzuweichen, und dieses Bestreben zeigte die stets wachsende *wahre* Kreisbewegung des Wassers an, bis diese endlich am größten wurde, wenn das Wasser selbst *relativ* im Gefäße ruhte. Jenes Streben hängt nicht von der Übertragung des Wassers in bezug auf die umgebenden Körper ab, und deshalb kann die *wahre* Kreisbewegung nicht durch eine solche Übertragung erklärt werden. Einfach ist die wirkliche kreisförmige Bewegung eines jeden sich umdrehenden Körpers, dem einfachen Streben, gleichsam als eigentümliche und angemessene Wirkung entsprechend. Die *relativen* Bewegungen sind nach den mannigfachen Beziehungen auf äußere Körper unzählig, als Schatten der Beziehung sind sie aller *wahren* Wirkung bar; außer insofern, als sie an jener *einfachen* und *wahren* Bewegung teilnehmen."[21]

Das Beispiel richtet sich gegen den cartesischen Relativismus, aber das Problem läßt sich auf diese Polemik allein nicht reduzieren. Newton wollte zeigen, daß die wahre Bewegung durchaus nicht die benachbarten Körper betreffen muß. Wenn sich das Wasser mit größter Geschwindigkeit relativ zu den Wänden des Gefäßes bewegt, entsteht keine Zentrifugalkraft. Wenn sich das Wasser dagegen nicht relativ zum Gefäß bewegt, wird sein Rand gehoben. Dementsprechend zeigt die Zentrifugalkraft, daß die Planetenbewegung absolut ist. Aus Newtons These vom Auftreten der absoluten Bewegung ergibt sich direkt, daß die Planetenbewegung auf gekrümmten Bahnen eine absolute Bewegung ist, weil die Planeten danach streben, sich vom Bahnzentrum zu entfernen.

Ausgehend von ähnlichen konkreten astronomischen und mechanischen Beobachtungen, konnte Newton auf die Erklärung der Zentrifugalkräfte durch konkrete Massen verzichten. Diese negative Schlußfolgerung war historisch berech-

[21] Ebenda, S. 29f.

tigt und spiegelte den Entwicklungsstand der naturwissenschaftlichen Kenntnisse des 17. Jahrhunderts wider. Aus der Gesamtheit der in der Wissenschaft vom 17. bis zum 19. Jahrhundert bekannten Erscheinungen ergab sich die These, daß die Umdrehung, die man nicht auf einen konkreten physikalischen Körper zurückführen kann, Ursache der Zentrifugalkraft sei.

Was bedeutet nun diese Konzeption für die Grundfragen des mechanischen Weltbildes, für die Probleme der diskreten Teilchen und des Mediums, in dem sie sich bewegen?

Wenn der Raum nur der geometrische, physikalisch neutrale Hintergrund im Bild der sich bewegenden Teilchen ist, so kann sich folglich die Vorstellung vom Kausalzusammenhang der Naturprozesse nicht auf den Raum und den Ort der Körper im Raum bei Erklärung ihres Verhaltens stützen. Zum Ideal der Wissenschaft wird eine Naturauffassung, welche die Gesamtheit der Erscheinungen allein durch die Bewegungen und Wechselwirkungen der Körper erklärt. Dies ist das *klassische Ideal der Wissenschaft.*

Nach diesem Ideal können die Inertialkräfte durch die Wechselwirkungen der Körper, nicht aber durch die Beziehung der Körper zum Raum erklärt werden. Ein ähnliches Prinzip war Ausgangspunkt für eine Kritik der Auffassungen Newtons vom absoluten Raum. Besonders Ernst Mach hat in seiner Arbeit „Die Mechanik in ihrer Entwicklung" Newtons Definition des absoluten Raums und der absoluten Zeit, die Erklärung der Zentrifugal- und überhaupt der Inertialkräfte durch die Beschleunigung eines Körpers kritisiert, die sich auf den leeren Raum bezieht. Einstein bezeichnete als „Machsches Prinzip" die These, daß in der Natur alles, einschließlich der Inertialkräfte, nur von der wechselseitigen Bewegung und der Wechselwirkung der Massen abhängt.

Die von Newton seinen „Mathematischen Prinzipien" vorangestellten „Erklärungen" geben das Programm des Buches: die Bestimmung der Bewegungen durch die sie hervorrufenden Kräfte und, umgekehrt, die Bestimmung der Kräfte durch die Bewegung. Die Realisierung dieses Programms beginnt im darauf folgenden Abschnitt mit der Überschrift „Grundsätze oder Gesetze der Bewegung". Es werden keineswegs früher angeführte Definitionen wiederholt. Die Newtonschen Bewegungsgesetze sind Axiome, die meßbare Größen eindeutig miteinander verknüpfen, wobei diese physikalisch nicht identisch sind. Im Gegensatz dazu werden in den Definitionen lediglich quantitative Bestimmungen der Materie, der Bewegung, der Trägheit, der Kraft, des Raumes und der Zeit gegeben. Diese Bestimmungen sind abstrakt, sie wurden aus Beobachtungen der Wirklichkeit gewonnen und dienen als Voraussetzung für die wissenschaftliche Analyse der Wirklichkeit.

Das erste Bewegungsgesetz lautet: „*Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.*"[22]

Dieses Gesetz ist seiner Form nach keine Gleichung, die beobachtete Erscheinungen verbindet. Aber es führt auf eine solche Gleichung, wenn wir es als Spezialfall des zweiten Gesetzes betrachten, des Gesetzes der Proportionalität

[22] Ebenda, S. 32.

von Kraft und Beschleunigung. Unter diesem Gesichtspunkt wird dieses Newtonsche Gesetz auf die Behauptung zurückgeführt, daß eine Kraft, die gleich Null ist, einer Beschleunigung gleich Null entspricht. Im Gegensatz zum dritten Gesetz, das die Trägheit als inhärente Kraft der Materie bestimmt, wird im ersten Gesetz keine positive Bestimmung der Materie gegeben, sondern lediglich eine negative Bestimmung der Bewegung. Das Inertialgesetz erscheint hier als Spezial(Null)fall des Gesetzes von der Proportionalität zwischen Kraft und Trägheit, und die Trägheit ist ein Spezialfall der Beschleunigung. Newton verändert seine Methode nicht; er geht von einem abstrakten negativen Begriff aus, um dann zu einem positiven zu kommen. Deshalb geht das Inertialgesetz dem Gesetz der Proportionalität von Kraft und Beschleunigung voraus. In der dritten Definition der „Mathematischen Prinzipien" wird die Trägheit als grundlegende Eigenschaft der Materie charakterisiert. Dabei wird der relative Charakter der Trägheit, die abstrakte Vernachlässigung der Kräfte im Bild der Bewegung betont. In der Erklärung zum ersten Bewegungsgesetz wird das noch deutlicher. Hier werden die Beispiele eines geworfenen Körpers, eines Kreisels und der Planeten angeführt, die ihre Bewegung beibehalten, weil keine Störung durch Kräfte vorhanden ist. Im ersten Gesetz bildet die Inertialbewegung eine Komponente der realen Bewegung, die in sich immer eine zweite Seite birgt, nämlich die Beschleunigung. Wir erhalten die Trägheit, wenn wir die Beschleunigung eliminieren, sie gegen Null gehen lassen. Dies kann ein realer Prozeß sein, wenn wir im Experiment oder in der Produktionstätigkeit tatsächlich den Luftwiderstand, die Reibung usw. ausschalten. Eine solche reale (natürlich unvollständige) Ausschaltung erreichte die Experimentiertechnik in einer Reihe von Experimenten, welche die Grundgesetze der Mechanik beweisen.

Das zweite Bewegungsgesetz bezieht sich auf die Beschleunigung: „*Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.*"[23]

In der Mechanik unserer Zeit entspricht der Einwirkung einer „bewegenden Kraft" einfach eine *Kraft*. Die Veränderung der Bewegungsgröße ist dieser Größe proportional. Newton benutzt hier noch nicht den Begriff der Beschleunigung, spricht statt dessen von der Bewegungsgröße und nimmt an, daß die Kraft im Verlaufe eines bestimmten Zeitintervalls wirkt. Nachdem Newton später den Leser mit den Berechnungsprinzipien des unendlich Kleinen bekannt gemacht hat, beweist er, daß beim Beginn einer durch eine beliebige konstante oder veränderliche Kraft erzeugten Bewegung der Weg dem Quadrat der Zeit proportional ist. Folglich liegt den Gesetzen der gleichförmig beschleunigten Bewegung eine Geschwindigkeit zugrunde, die durch eine „seit Anfang der Bewegung" wirkende Kraft hervorgebracht wird, die der Zeit proportional ist. Da aber die Masse des Körpers unveränderlich ist, verändert sich auch die Bewegungsgröße proportional der Zeit. Also ist auch in unendlich kleinen Zeitintervallen die Zunahme der Geschwindigkeit und der Bewegungsgröße der Zeit proportional. Die Geschwindigkeit ist der Grenzwert des Quotienten aus Weg und Zeit, wenn Zeit und zurück-

[23] Ebenda.

gelegter Weg unendlich klein werden. Der Grenzwert des Quotienten des Geschwindigkeitszuwachses nach der Zeit, in deren Verlauf eine Kraft wirkt, ist der Veränderung der Bewegungsgröße proportional. Diese moderne Formulierung des zweiten Newtonschen Gesetzes wurde erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Siméon Denis Poisson gegeben.

Newtons drittes Bewegungsgesetz lautet: „*Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.*"[24] Newton illustriert dieses Gesetz durch eine Reihe von Beispielen. Wenn man mit dem Finger auf einen Stein drückt, so wird dieser mit gleicher Kraft vom Stein gedrückt. Wenn ein Pferd einen an einem Seil befestigten Stein zieht, so empfindet es selbst die durch das Seil übertragene Kraft des Steines, wobei die Elastizität des Seils nach beiden Richtungen gleich wirkt. Beim Zusammenstoß zweier Körper erleiden beide die gleiche Veränderung der Bewegungsgröße, diese Veränderungen haben entgegengesetzte Richtungen. Die Geschwindigkeitsänderungen sind den Massen der Körper umgekehrt proportional. Nach Newton bezieht sich das dritte Gesetz nicht nur auf Stöße, sondern auch auf die Anziehung.

Nach Newtons Auffassung kann man Wirkung und Gegenwirkung sowohl als eine auf den Körper wirkende Kraft als auch als Trägheitskraft dieses Körpers bezeichnen. Wenn der Körper A auf einen Körper B stößt, so ist für B die Einwirkung von A eine einwirkende Kraft, während die Trägheit eine fiktive Kraft ist, die dieser Einwirkung gleichsam entgegenwirkt. Die Inertialkraft von B ist für A eine real wirkende Kraft. Bei Veränderungen des Bezugssystems können reale und fiktive Kräfte die Plätze tauschen. Die reale, auf den Körper wirkende Kraft erzeugt die Beschleunigung, die fiktive, nicht auf den Körper einwirkende Kraft ruft auch keine Beschleunigung dieses Körpers hervor. Folglich ist der Unterschied zwischen realer und fiktiver Kraft relativ; er ist davon abhängig, welchen Körper wir untersuchen, welchem von den beiden sich wechselseitig bewegenden Körpern wir die wahre Bewegung zuschreiben, mit welchem Körper das Bezugssystem unbeweglich verbunden ist.

Aus den Vorstellungen Newtons über die Relativität von Wirkung und Gegenwirkung wurde eine Reihe von Schlußfolgerungen abgeleitet. So gründet sich das Prinzip d'Alemberts auf die Äquivalenz und Wechselseitigkeit der realen und fiktiven Kräfte, auf die einfache Tatsache, daß jede Kraft als real angesehen werden kann, wenn sie auf den gegebenen Körper einwirkt, und daß die fiktive Kraft real, die realen Kräfte hingegen fiktiv werden, sobald wir den Ursprung der Koordinaten von dem einen Körper auf einen anderen übertragen und den zuvor für unbeweglich gehaltenen Körper als beweglich ansehen. Deshalb können wir, indem wir die fiktiven Kräfte in die Gleichung einbeziehen und mit den realen gleichstellen, die Körperbewegung eliminieren, die dynamische Aufgabe gänzlich auf eine statische reduzieren.

Nach dem zweiten Newtonschen Gesetz ruft die Kraft eine ihr proportionale Beschleunigung hervor. Wenn die Kräfte von verschiedenen Seiten auf den Körper

[24] Ebenda.

wirken und ihre geometrische Summe gleich Null ist, so bleibt der Körper in Ruhe oder bewegt sich geradlinig und gleichförmig. Wenn die geometrische Summe der einwirkenden Kräfte eine Resultante ergibt, die nicht gleich Null ist, so wird diese Resultante gleich dem von Null verschiedenen Produkt aus Masse und Beschleunigung sein. Wir können deshalb sagen, daß eine auf einen sich bewegenden Körper wirkende Kraft und das Produkt aus Masse und Beschleunigung, mit umgekehrtem Vorzeichen versehen, gleich Null ist. Der Subtrahend (das Produkt aus Masse und Beschleunigung mit umgekehrten Vorzeichen) kann der Inertialkraft gleichgesetzt werden: sie entspricht der trägen Masse, ihre Wirkung ist proportional zur einwirkenden Kraft und dieser entgegengesetzt. Es ist eine fiktive Kraft, weil sie nicht auf den sich bewegenden Körper einwirkt. Sieht man sie als reale Kraft an, so werden alle Kräfte ausgeglichen, und der Körper bewegt sich nicht beschleunigt. Daher läßt sich eine dynamische Aufgabe auf eine statische reduzieren, wenn man den wirkenden Kräften die Trägheitskräfte hinzufügt.

Nach der Formulierung des Gesetzes der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung leitet Newton aus den drei Bewegungsgesetzen Folgerungen ab. In seiner fünften Folgerung formuliert er das Prinzip der Relativität der geradlinigen und gleichförmigen Bewegung. „*Körper, welche in einem gegebenen Raum eingeschlossen sind, haben dieselbe Bewegung unter sich; dieser Raum mag ruhen oder sich gleichförmig und geradlinig, nicht aber im Kreise fortbewegen.*“[25]

Diese Folgerung aus den Bewegungsgesetzen wird mit der Unveränderlichkeit der Summe und der Differenz der Körperbewegungen im Inertialsystem bewiesen. Newton erklärt: „Die Unterschiede der Bewegungen nach derselben Seite und die Summe derer nach entgegengesetzter Richtung sind nämlich (der Annahme zufolge) anfangs in beiden Fällen dieselben, und aus diesen Unterschieden oder Summen entspringen Bewegungen und Stöße, durch welche die Körper aufeinander wirken. Es werden daher nach dem 2. Gesetz die Wirkungen des Zusammentreffens in beiden Fällen gleich sein, und deshalb die Bewegungen unter sich in dem einen Falle gleich bleiben den Bewegungen unter sich im anderen Falle. Dasselbe kann durch einen Versuch deutlich erwiesen werden. Alle Bewegungen finden auf dieselbe Weise in einem Schiffe statt, mag dieses ruhen, oder sich gleichförmig und geradlinig fortbewegen.“[26] Der Beweis basiert also auf der Addition der Geschwindigkeiten.

Bei der Darlegung seines Relativitätsprinzips ging Newton von der Vorstellung eines absoluten Raumes aus. Wenn man diesen Begriff eliminiert, so verliert die geradlinige Bewegung der Koordinatensysteme ihren Sinn, ebenso die Ruhe, und man muß, um das Relativitätsprinzip aufrechterhalten zu können, vom Inertialbegriff ausgehen. Das Inertialsystem wird zum Grundbegriff, d. h. ein Koordinatensystem, in dem sich ein sich selbst überlassener Körper geradlinig und gleichförmig bewegt. Solche Systeme werden heute auch als Galileische Systeme bezeichnet. Das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik behauptet,

[25] Ebenda, S. 38.
[26] Ebenda.

daß die Gesetze der Mechanik für eine unendliche Zahl von Inertialsystemen richtig bleiben, die sich zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen. In der Gleichberechtigung aller Systeme besteht auch Newtons Relativitätsprinzip.

Was heißt Unveränderlichkeit der Gesetze der Mechanik für alle Inertialsysteme? Die Gesetze der Mechanik sprechen von Beschleunigungen, die den Kräften proportional sind. Die Geschwindigkeiten sich bewegender Körper hängen natürlich von den Koordinaten, auf die sie bezogen sind, ab. Wenn man die Geschwindigkeit und die Koordinaten in einem Inertialsystem kennt, kann man die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Körpers und seine Koordinaten in jedem Zeitmoment in einem anderen Inertialsystem berechnen. Einige Größen werden dabei nicht verändert. Haben wir zwei Körper, die die gleiche Entfernung voneinander einhalten, so hängt der Unterschied zwischen ihren Koordinaten nicht davon ab, in welchem Koordinatensystem wir diese Körper betrachten. Eine solche Größe wird als invariant hinsichtlich des Übergangs von einem Koordinatensystem zu einem anderen bezeichnet. Bei einer Drehung der Koordinatensysteme erweist sich die Entfernung der Körper als invariant gegenüber dem Nullpunkt des Koordinatensystems. Wenn sich ein System in bezug auf ein anderes System geradlinig und gleichförmig mit der Geschwindigkeit v bewegt, so können wir in jedem System die Koordinatenachsen so richten, daß zum Beispiel in beiden Systemen die x-Achsen zusammenfallen; dann haben wir zwei Koordinatensysteme, von denen sich das eine hinsichtlich des anderen auf der x-Achse bewegt. Welche Größen werden die Koordinaten der sich bewegenden Körper annehmen, wenn sie sich nicht mehr auf das erste System beziehen, sondern auf das zweite, das sich in bezug auf das erste mit der Geschwindigkeit v bewegt? In der Zeit t verschiebt sich das zweite Koordinatensystem gegen das erste längs der Achse x um einen Abstand, der gleich der Geschwindigkeit v ist, multipliziert mit der Zeit t. Die Koordinaten y und z werden bei der Verschiebung nicht verändert, aber die x-Koordinate wird im neuen System um vt kleiner sein als im alten. Wenn man nun die Koordinaten im zweiten System mit x', y' und z' bezeichnet, gelangt man zu folgenden Transformationsgleichungen beim Übergang von einem Koordinatensystem zu einem anderen:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z.$$

Diese Transformationen werden als Galileitransformationen bezeichnet.

4. *Das Gesetz der universellen Gravitation*

In der Wissenschaft des 18. und 19. Jahrhunderts spielten die positiven Resultate die Hauptrolle, zu denen Newton in seinen „Mathematischen Prinzipien“ gekommen war. Sie wurden als Axiome betrachtet, aus denen mit Hilfe mathematischer, vor allem analytischer Methoden neue Schlüsse abgeleitet werden konnten. Im 20. Jahrhundert hatte dagegen die Kritik einiger Grundbegriffe der Newtonschen Mechanik für die Wissenschaft besondere Bedeutung.

Wir wollen uns mit einem dieser Grundbegriffe, mit dem des absoluten Raums, näher beschäftigen. Er wurde aus den Inertialkräften abgeleitet, die den absoluten Charakter der beschleunigten Bewegung demonstrieren. Ein anderer Grundbegriff ist der der absoluten Zeit.

Newton grenzt die absolute Zeit, die nicht von den Ereignissen abhängig ist, von der relativen Zeit ab: „*Die relative, scheinbare* und *gewöhnliche Zeit* ist ein fühlbares und äußerliches, entweder genaues oder ungleiches Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr."[27]

Durch die weitere Entwicklung der Mechanik wurde der Begriff der absoluten Zeit konkretisiert und von der Definition des absoluten Raumes unterschieden. Der absolute Raum kennt kein Bezugssystem. Die Stellung im absoluten Raum, der absolute Ort des Körpers wird nicht durch seinen Abstand vom Bezugskörper, sondern durch einen dynamischen Effekt bei einer beschleunigten Bewegung bestimmt. Ein solcher Begriff des absoluten Raumes kann nur existieren, wenn der Raum als homogen angenommen wird. Man könnte meinen, die absolute Zeit wäre die Zeit, die nicht auf ein konkretes Ereignis bezogen wird, das als Ausgangspunkt des Bezuges dient. Aber die Zeit wurde schon in der Antike für homogen gehalten. Die Schöpfungslegenden und die Vorstellungen von absoluten Seinszyklen hatten auf den positiven Inhalt der naturwissenschaftlichen Auffassungen keinen Einfluß. Wenn es keine als Zeitgrenzen dienenden Ereignisse gibt, die als natürlicher Anfang des Zählens dienen usw., so kann die absolute Zeit keinen Sinn in Analogie zum absoluten Raum mit natürlichen Grenzen und einem natürlichen Zentrum haben. Schon im Altertum wurde ein anderes Problem aufgeworfen: die Zeit wird durch die Bewegung gemessen, die Bewegung besitzt unterschiedliche Geschwindigkeit. Wie kann man nun eine Zeit, die durch eine Bewegung gemessen wird, mit einer anderen Zeit identifizieren, die mit einer anderen Bewegung gemessen wird? Wenn man beide identifizieren kann, so existiert eine einheitliche Zeit; sie ist von der Bewegung eines Körpers unabhängig, existiert und dauert an sich. Die absolute Zeit ist also nicht davon abhängig, mit welcher Geschwindigkeit sich ein System bewegt, in dem sie gemessen wird.

In Newtons Mechanik dient als Garantie einer solchen Unabhängigkeit der Zeit von der Bewegung, als Garantie für die Existenz einer für das gesamte Weltall einheitlichen Zeit die momentane Ausbreitung der Wechselwirkungen. Die Grundlage für die Verabsolutierung des Raumes durch Newton besteht in den Inertialkräften, in der Entstehung von Kräften, die nicht durch Wechselwirkung der Körper verbunden sind. Die Grundlage der Verabsolutierung der Zeit ist bei Newton die momentane Fernwirkung. Die Annahme einer augenblicklichen Ausbreitung der Wechselwirkungen ist in der klassischen Physik allgemeiner und fundamentaler als eine Fernwirkung im gewöhnlichen räumlichen Sinne. Sie ignoriert das die Wechselwirkung der Körper übertragende Medium. Sowohl die festen Kerne bei Descartes als auch die sich durch die Leere ausbreitenden Kräfte bei Newton und seinen Anhängern garantieren die Gleichzeitigkeit zweier Er-

[27] Ebenda, S. 25.

eignisse: 1. ein im Punkte a befindlicher Körper A wirkt auf einen Körper B, und 2. ein Körper B im Punkte b erfährt diese Einwirkung im gleichen Zeitmoment.

Die universelle, sich unendlich schnell vollziehende Wechselwirkung der Körper zeigt sich in ihrer Schwere. Das Streben der Körper nach oben wird nur durch das scheinbare Fehlen der Schwerkraft erklärt, das sich auf die größere Schwerkraft der umgebenden Körper zurückführen läßt. Newton schließt aus der Gleichheit der Beschleunigung aller fallenden Körper, die durch eine Vielzahl von Experimenten bewiesen wurde, daß sich die Gewichte der Körper, die vom Erdzentrum gleichweit entfernt sind, wie die Massen der Körper verhalten. Die Kräfte, mit denen die Körper die Erde anziehen, sind bei gleicher Entfernung vom Erdzentrum ebenfalls den Massen proportional. Hieraus folgt, daß sich die vom Körper ausgehende Schwerkraft aus den Schwerkräften seiner Teile zusammensetzt. Deshalb ziehen sich alle Erdkörper mit einer Kraft an, die der Masse eines jeden Körpers proportional ist.

Nachdem Newton die Wesenszüge der Schwerkraft auf der Erde festgestellt hatte, ging er zur Bestimmung der Schwerkraft im Kosmos über. Aus der Geradlinigkeit der Trägheitsbewegung ergibt sich, daß auf Körper, die sich auf einer gekrümmten Bahn bewegen, notwendigerweise bestimmte Kräfte einwirken. Die Planeten befinden sich somit ständig unter dem Einfluß von Kräften. Bewegt sich ein Körper so auf einer Kurve, daß sein Radiusvektor der Zeit proportionale Flächen beschreibt, so befindet er sich, wie Newton beweist, unter der Einwirkung einer auf das Zentrum gerichteten Kraft. Diese Kraft kann man in bezug auf den sich bewegenden Körper als Zentripetal- und in Hinsicht auf den Zentralkörper als Anziehungskraft bezeichnen. Newton zeigt weiter, daß bei einem Körper, wenn er sich so bewegt, daß das Quadrat der Umlaufzeiten dem Kubus der mittleren Entfernungen dieses Körpers vom gemeinsamen Zentrum proportional ist, die auf den Körper wirkenden Schwerkräfte dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional sind. Dementsprechend entwickelt Newton die Keplerschen Gesetze aus den wechselseitigen Gravitationskräften der Himmelskörper. Die Planeten bewegen sich auf ihren elliptischen Bahnen infolge einer zentralen bewegenden Kraft, die auf den Brennpunkt jeder Bahn gerichtet ist. Wenn sich die Planeten dem Zentrum nähern, wächst die Kraft proportional dem Quadrat der Entfernungen. Sie verringert sich in dem Maße, wie sich die Planeten vom Zentrum entfernen. Aus diesem einfachen Gesetz ließen sich alle Keplerschen Gesetze leicht ableiten.

Man kann Newtons Gedankengang in allgemeinen Zügen im folgenden, sehr vereinfachten Schema darstellen. Nach dem ersten Keplerschen Gesetz sind die Planetenbahnen elliptisch. Im vereinfachten Falle, wenn die Exzentrik gleich Null ist, werden sie durch Kreise dargestellt. Dann ergibt sich aus dem zweiten Keplerschen Gesetz die Konstanz der Geschwindigkeit der Planetenbewegung auf der Kreisbahn. Ein Planet besitzt eine auf das Zentrum gerichtete Beschleunigung, die die Geschwindigkeitsrichtung des Planeten ständig verändert, ihn auf einer Kreisbahn hält und ihm keine geradlinige Bewegung ermöglicht.

Newton formuliert die zentripetale Beschleunigung im ersten Buch seiner „Mathematischen Prinzipien“ (Theorem IV). Ihre Größe ist gleich dem Quadrat

der Geschwindigkeit der gleichförmigen Kreisbewegung, dividiert durch den Radius. In unserer Sprache kann man diese Abhängigkeit mit der Formel ausdrücken:

$$f = -\frac{v^2}{r},$$

wobei f die zentripetale Beschleunigung, v die Geschwindigkeit der Kreisbewegung und r der Radius ist.

Man kann weiter unter Benutzung des dritten Keplerschen Gesetzes zeigen, daß die zentripetale Beschleunigung gänzlich von der Entfernung zwischen Planet und Sonne abhängt. Nach dem dritten Gesetz haben die Kuben der großen Halbachsen der Ellipsen (und im Falle der Kreisbahnen die Kuben der Radien) eine für alle Planeten feststehende Beziehung zu den Quadraten der Umlaufzeiten. Deshalb kann man die Umlaufzeit durch einen Radius ausdrücken, d. h. durch die Entfernung von den Planeten zur Sonne.

Das dritte Keplersche Gesetz läßt sich durch folgende Formel ausdrücken:

$$\frac{r^3}{t^2} = \frac{1}{c},$$

wobei t die Periode des Bahnumlaufs, r der Radius der Bahn und c ein Proportionalitätsfaktor ist, der für alle Körper, die sich um ein Zentrum bewegen, konstant ist. Die Umlaufsgeschwindigkeit für einen Kreis ist gleich

$$\frac{2\pi r}{t},$$

d. h. gleich der Kreislänge geteilt durch die Umlaufszeit; wenn wir diesen Wert in die Formel für die zentripetale Beschleunigung einsetzen und die Periode der Bahnbewegung durch den Radius ausdrücken, erhalten wir

$$f = \frac{4\pi^2}{c r^2}.$$

Die zentripetale Beschleunigung der Planeten ist also von keiner anderen Größe abhängig als von den Entfernungen zwischen Planeten und Sonne. Die zentripetale Beschleunigung ist dem Quadrat der Entfernungen umgekehrt proportional. Die als Ursache der zentripetalen Beschleunigung der Planeten dienende Kraft wirkt, wie auch die Beschleunigung selbst, in Richtung auf die Sonne. Mit anderen Worten: diese Kraft zieht den Planeten an die Sonne. Sie ist gleich der Beschleunigung, multipliziert mit der Masse. Andererseits ist die Schwerkraft, die den auf das Zentrum der Erde gerichteten Körpern eine gleichförmige Beschleunigung erteilt, ebenfalls der Masse proportional. Newton nahm an, daß

hier keine Analogie, sondern eine Identität vorliegt. Die Genialität dieser Idee ist heute schwer abzuschätzen, da das Gesetz der universellen Gravitation so tief in der Wissenschaft verwurzelt ist. Aber Newton benötigte im 18. Jahrhundert die ganze Kraft seines Denkens, um die Bewegung der Himmelskörper mit dem Fall irdischer Körper auf die Erde identifizieren zu können. Damit wurde die Vereinigung von Astronomie und Mechanik der irdischen Körper vollendet.

Newton untersucht weiter, ob die astronomischen Beobachtungen die umgekehrte Proportionalität zwischen dem Quadrat der Entfernungen und der zentripetalen Beschleunigung bestätigen. Er vergleicht zwei Körper: einen Himmelskörper, der sich auf einer Kreisbahn um die Erde mit gleicher Entfernung bewegt wie der Mond, und einen anderen Körper, der aus geringer Höhe auf die Erde fällt. Newton vergleicht nun zwei Größen: die Abweichung des Mondes von der geradlinigen Bewegung und den vom fallenden Körper im Verlauf dieser Zeit zurückgelegten Weg. Die Abweichung des Mondes von seiner Bahntangente ist im Verlauf eines bestimmten kleinen Zeitabschnitts der Zentripetalkraft proportional, die den Mond an die Erde anzieht. Die wirkliche Mondbewegung setzt sich aus der Trägheitsbewegung auf der Tangente und dem Fall in Richtung zur Erde zusammen, der durch die Zentripetalkraft hervorgerufen wird. Wenn wir die wirkliche Mondbewegung in diese Komponenten zerlegen, erhalten wir die Abweichung des Mondes von der Tangente. Sie ist, wenn man die Entfernung des Mondes vom Erdzentrum und die Umlaufzeit des Mondes kennt, leicht zu bestimmen.

Das ist die erste Größe. Sie entspricht der Kraft, mit der der Mond von der Erde angezogen wird. Die zweite Größe, die Entfernung, die ein auf die Erde fallender Körper im gleichen kurzen Zeitabschnitt zurücklegt, ist durch unmittelbare Beobachtung leicht zu ermitteln. Newton verglich die Abweichung des Mondes von der geradlinigen Bewegung mit dem von einem auf die Erde fallenden Körper im gleichen Zeitabschnitt zurückgelegten Weg. Er entdeckte, daß das Verhältnis zwischen beiden Größen dem Quotienten des Quadrates des Erdradius und des Quadrates des Radius der Mondbahn gleich ist. Folglich wird der Mond von der Erde um so viel Male weniger als ein Erdkörper angezogen, um so mehr als das Quadrat seines Bahnradius größer als das Quadrat des Erdradius ist.

Newton erhielt bei seinen Berechnungen für die Zentripetalkräfte des Mondes eine um 3600 mal kleinere Größe als für die Schwerkraft auf der Erdoberfläche. Zu jener Zeit war bekannt, daß die Entfernung vom Erdzentrum zum Mond 60 Erdradien beträgt. Wenn sich nun, sagt Newton, der Mond auf der Erdoberfläche befinden würde, so würde sich die Anziehungskraft proportional dem Quadrat der Entfernungen, d. h. um $60^2 = 3600$ mal, vergrößern. Die Anziehung des Mondes zur Erde, die den Mond eine krummlinige Bahn beschreiben läßt, ist die irdische, auf den Mond ausgedehnte Schwerkraft. Wenn der Mond von der Erde angezogen wird, so wird die Erde im gleichen Maße vom Mond angezogen. Die Bewegung von Ebbe und Flut auf der Erdoberfläche steht mit der Anziehung des Mondes in Zusammenhang. Aus der Umdrehung der Trabanten um die Planeten ergibt sich, daß die Zentripetalkräfte der Trabanten auf das Zentrum der Planeten gerichtet sind, und daß diese Kräfte den Quadraten der Entfernung

Planet — Trabant umgekehrt proportional sind. Somit wird nicht nur die Bewegung der Planeten, sondern auch die ihrer Begleiter durch das Gravitationsgesetz erklärt.

Newton sucht weiter die Bewegung der Kometen zu erklären. Sie kommen aus sehr fernen Bereichen und gehen in verhältnismäßig geringem Abstand an der Sonne vorbei. Newton beweist, daß sich die Kometen auf Kegelschnitten mit der Sonne in einem Brennpunkt bewegen, wobei die Radiusvektoren Flächen beschreiben, die der Zeit proportional sind. Hieraus ergibt sich, daß die die Kometen auf ihren Bahnen haltende Kraft ebenfalls dem Quadrat der Entfernung vom Zentrum der Sonne proportional und auf dieses Zentrum gerichtet ist, daß wir auch hier der universellen Gravitation begegnen.

Nach den Himmelskörpern behandelt Newton die Mikrowelt. Er will beweisen, daß die kleinsten Stoffteilchen ebenfalls der wechselseitigen Anziehung unterworfen sind, und behauptet, daß ausnahmslos alle Körper, von den Fixsternen bis zu den kleinsten Teilchen, einer Schwerkraft unterliegen, die der Masse proportional und dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist.

In der Welt der Himmelskörper ist die Gravitation wechselseitig. Die Erde kann nicht mehr als absolutes Gravitationszentrum angesehen werden. Sie zieht den Mond an, wird aber selbst von der Sonne angezogen, und all dies muß durch den hinzugefügten Einfluß des Mondes auf die Erde, der Erde auf die Sonne usw. ergänzt werden. Dementsprechend verwandelt sich der Ausdruck für die zentripetale Beschleunigung in den Ausdruck des Gesetzes der universellen Wechselwirkung:

$$F = k \frac{mm'}{r^2}.$$

Dabei ist k ein Proportionalitätsfaktor, m und m' sind die Massen der sich gegenseitig anziehenden Körper. Die der Himmelsmechanik zugrunde liegende Formel der universellen Gravitation besagt, daß die Himmelskörper mit allen anderen Körpern in Wechselwirkung angenommen werden. Die Aufgabe für zwei Körper verwandelt sich in eine Aufgabe für drei und mehr Körper. Die Entwicklung der Himmelsmechanik gewinnt damit den Charakter einer fortschreitenden Komplizierung und Konkretisierung der Ausgangsformeln, die die wechselseitige Gravitation beschreibt.

Die Theorie der universellen Gravitation schließt sich historisch an die Äußerungen Galileis in den „Discorsi" über die parabolische Bewegung eines geworfenen Körpers an. Bei Galilei wird die Bewegung eines geworfenen Körpers unter irdischen, bei Newton hingegen unter kosmischen Maßstäben untersucht. Die kosmische Bewegung der Himmelskörper vollzieht sich auf Kegelschnitten durch die Trägheit und die auf einen Brennpunkt gerichtete Schwerkraft. Die parabolische Bewegung eines geworfenen Körpers war faktisch ein Spezialfall dieser Bewegung. Hier lagen die Trägheit des ursprünglichen Anstoßes und die Schwerkraft vor. Galilei betrachtete allerdings die Schwerkraft als in parallelen Richtungen wirkend. Dies ergab sich aus den irdischen Maßstäben der „Discorsi", aus den

Vorstellungen von der horizontalen Erdoberfläche. Natürlich ließ sich die wirkliche Richtung der Schwerkräfte beim Übergang zu kosmischen Maßstäben leicht erkennen.

Zur Erklärung der Gesetze der Himmelsmechanik wurde die von Huygens erarbeitete Theorie der Zentrifugalkräfte benötigt. Huygens schuf die unmittelbaren Voraussetzungen für Newtons Theorie, allerdings nicht für eine geschlossene Konzeption, wie sie in den „Mathematischen Prinzipien" niedergelegt ist, wohl aber für ihren ursprünglichen Entwurf.

Im August 1665 wurde an der Universität Cambridge zeitweilig die Lehrtätigkeit eingestellt, denn von 1665 bis 1667 wütete in England die Pest. Während dieser zwei Jahre weilte Newton in seinem Heimatort Woolsthorpe. Dort nahm er seine größten wissenschaftlichen Arbeiten in Angriff. Newton gelangte hier erstmalig zu den Grundideen seiner mathematischen, mechanischen und optischen Arbeiten. In den Pestjahren durchdachte Newton in Woolsthorpe die Probleme der universellen Gravitation, der Differentialrechnung und der Farbentheorie. Aber erst zwanzig Jahre später legte Newton seine Überlegungen zur Gravitationstheorie in seinen „Mathematischen Prinzipien" dar. In diesen zwanzig Jahren widmete sich Newton der Lösung von Teilproblemen, ohne welche das Gesetz der universellen Gravitation nicht exakt und widerspruchsfrei entwickelt werden konnte. So war die völlige Übereinstimmung von Schwere und kosmischen Zentripetalkräften bei gleichen Entfernungen zu beweisen. Weiter mußten die für die Kreisbewegung gewonnenen Schlußfolgerungen auf elliptische Bahnen ausgedehnt werden. Schließlich mußte Newton von der Schwerkraft der Punkte zur Schwerkraft der Körper übergehen.

Man darf nicht annehmen, daß Newton in diesen Jahren lediglich einen exakten mathematischen Beweis des Gesetzes der universellen Gravitation suchte. Diese Suche verband sich mit dem Durchdenken physikalischer Hypothesen, die die Gravitation erklärten. In seinen „Mathematischen Prinzipien" beseitigte Newton allerdings die hypothetischen Annahmen, und das Gebäude des neuen Systems zeigte sich den Zeitgenossen als scheinbar absolut exakte Konstruktion, die keiner Hypothesen bedurfte, gänzlich auf Erfahrungen und mathematischen Beweisen aufgebaut war.

Wie sich zeigt, war die Bestätigung von vorläufigen nicht eindeutigen Hypothesen ebenfalls eine Bedingung für die Publizierung der Newtonschen Arbeiten. Newton hat jedenfalls in den zwanzig Jahren nach seinen ersten Überlegungen und Berechnungen keine Arbeit zum Gravitationsproblem veröffentlicht. Erst 1685 löste er endgültig das Problem der zentripetalen Beschleunigung der Körper, die sich auf einer beliebigen geschlossenen Bahn bewegen, das Problem der Anziehung sphärischer Körper. Er benutzte dabei neue Ergebnisse über die Größe des Meridiangrades. Danach gewann das Gravitationsgesetz die klassische Form der „Mathematischen Prinzipien".

In den Arbeiten der achtziger Jahre tilgte Newton konsequent die Spuren der physikalischen Hypothesen, von denen er bei der Suche nach dem Gravitationsgesetz ausgegangen war. In diesen Jahren wurde der exakte mathematische Beweis des Gravitationsgesetzes geliefert. Daraus wurden die Keplerschen Gesetze

entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt kam Newton auch zur endgültigen Formulierung seines Bewegungsgesetzes. Im Jahre 1687 erschien endlich, nach vielfältiger Umarbeitung, die erste Ausgabe der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie".

Zu Beginn der achtziger Jahre arbeiteten gleichzeitig einige Mitglieder der Royal Society am Gravitationsproblem. Edmond Halley, ein Freund Newtons, ging von Huygens' Lehre von den Zentrifugalkräften aus. Es gelang ihm 1683, aus dem dritten Keplerschen Gesetz die Proportionalität zwischen der Schwere und dem reziproken Wert des Quadrats der Entfernung abzuleiten. Halley nahm an, daß die Bahnen kreisförmig seien, und bewies unter Zuhilfenahme des Huygensschen Theorems das Gravitationsgesetz. Er erinnert Newton in einem Brief vom Jahre 1686 an Gespräche, die einige Jahre zuvor in London zwischen Wren, Robert Hooke und Halley geführt worden waren. Alle drei hatten sich auf verschiedenem Wege der These von der Gravitation genähert, die dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist. Sie waren von der Notwendigkeit überzeugt, die Keplerschen Gesetze aus dem Gravitationsgesetz zu entwickeln. Aber weder Hooke noch Wren oder Halley vermochten die Formel der elliptischen Bewegung, die den Keplerschen Gesetzen entsprach, aus der Gravitation und aus der Verbindung der Tangential- und Zentripetalkräfte abzuleiten. Nach Halley versprach Wren demjenigen, der die Entstehung einer Ellipse durch die im quadratischen Verhältnis der Entfernung abnehmende Kraft überzeugend beweise, sogar eine Prämie — ein Buch im Werte von 40 Schilling. Im August 1684 weilte Edmund Halley in Cambridge und besuchte Newton, um mit ihm über sie gemeinsam interessierende Probleme zu sprechen. Newton bemerkte, daß er den Beweis, den Wren und Halley suchten, bereits besitze. Er versprach, Halley das Manuskript zu schicken, das auch im November 1684 in dessen Händen war. Einen Monat später referierte Halley den Inhalt des Manuskriptes vor der Royal Society. Das Manuskript „Über die Bewegung" (de motu) ist faktisch die erste Variante der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie".

Da die „Mathematischen Prinzipien" über Jahrhunderte hin als Offenbarung angesehen wurden, übersahen viele Wissenschaftler die Widersprüche und die offenen Probleme. Aber gerade durch diese vorwärtsdrängenden Widersprüche erhält auch die Gestalt Newtons vielseitige, lebendige, widersprüchliche und interessante Züge.

Betrachten wir das Gesetz der universellen Gravitation unter diesem Gesichtspunkt, so lassen sich einige „Mängel" feststellen. Sie wurden später Anlaß zur Kritik des Newtonschen Systems, seiner Entwicklung und Verallgemeinerung. Dazu gehören die Nichtübereinstimmung der Merkurbewegung mit den auf dem Gravitationsgesetz basierenden Berechnungen, der zufällige Charakter des Zusammenfallens von schwerer und träger Masse, die Unfähigkeit, mittels der Gravitation die Genesis des Sonnensystems zu erklären, und die Übertragung der Gravitation durch das Vakuum.

Die elliptische Bahn des Merkur muß sich durch die Anziehung der anderen Planeten allmählich ändern. Aber wenn man eine Störung ausschließt, so muß die Bahn eines jeden Planeten eine genaue Ellipse beschreiben, und deren große

Achse muß unbeweglich im Raum sein. Leverriers Arbeiten aus dem Jahre 1846 haben unwiderlegbar gezeigt, daß sich die große Achse der Bahn des Merkur in Wirklichkeit langsam dreht, im Laufe eines Jahrhunderts um 43 Bogensekunden verschiebt. Die prinzipielle Bedeutung dieser Tatsache wird noch dadurch erhöht, daß sich diese Nichtübereinstimmung gerade auf Merkur, den sonnennächsten Planeten, bezieht. In der Nähe der Sonne sind die den Planeten an die Sonne anziehenden Kräfte besonders groß. Daher zeigt die Tatsache, daß der der Sonne am nächsten stehende Planet von der vom Newtonschen Gesetz exakt vorgeschriebenen Bewegung abweicht, daß das Gesetz offensichtlich selbst nicht exakt ist. Jahrzehntelang wurde diesem Umstande keine besondere Bedeutung beigemessen, da das Gravitationsgesetz durch Hunderte anderer Beobachtungen bestätigt wurde.

Ein weiterer Umstand wurde durch die Erfolge des Gravitationsgesetzes nicht erkannt. Aus Newtons Mechanik folgte keineswegs die Proportionalität von Gewicht und Masse. Mehr als zwei Jahrhunderte lang wurde dem Rätsel der Identität von träger und schwerer Masse wenig Beachtung geschenkt. Eine rationale Erklärung dieser Identität gab erst eine neue Gravitationstheorie.

Der ernsteste „Mangel" der Newtonschen Himmelsmechanik ist der erste Anstoß. Gravitation und Trägheit erklären, wie die elliptischen Planetenbahnen erhalten werden. Den Anfang dieser Bewegung und die Exzentrik der Bahn kann man aber nur durch einen ersten Anstoß erklären. Newton betraute Gott mit dieser Funktion, wobei die Einmischung Gottes nicht nur einmal erfolgen konnte. Von Zeit zu Zeit muß Gott diesen ersten Anstoß wiederholen. Nach Newton ergibt sich aus dem Gravitationsgesetz, daß sich die Wege der Himmelskörper letzten Endes verändern. Zur Wiederherstellung der Himmelsordnung ist eine erneute Einmischung Gottes erforderlich.

Diese Gott zugedachte Rolle befriedigte seine Verteidiger auf dem Kontinent keineswegs. In seinem ersten Brief an die Prinzessin Karoline (1715), beklagte sich Leibniz über den Verfall der natürlichen Religion in England und schrieb speziell über Newton: „Herr Newton und seine Anhänger haben außerdem eine spaßige Auffassung vom göttlichen Geschehen. Nach seiner Meinung hat Gott das Bedürfnis, von Zeit zu Zeit seine Uhren aufzuziehen, andernfalls bleiben sie nämlich stehen. Er hat nicht daran gedacht, diese Uhren als einen ewigen Beweger anzulegen. Diese göttliche Maschine ist zudem nach seiner Meinung so unvollkommen, daß Gott sie von Zeit zu Zeit einölen und sogar verbessern muß — wie ein Uhrmacher für einen um so schlechteren Meister gehalten wird, je öfter er zu Reparaturen der Uhren Zuflucht nehmen muß."[28]

Diejenigen Gelehrten, die für einen Gott in der Natur keinen Platz ließen, konnte die Theorie des ersten Anstoßes noch weniger befriedigen. An dieser Stelle war allerdings keine grundlegende Umarbeitung des Newtonschen Systems erforderlich. Die kosmogonischen Theorien erklärten den ersten Anstoß mit physikalischen Prozessen im Primärstoff. Somit stand dieser „Makel" der Newtonschen Auffassung mit dem Wesen der Mechanik in keinem Zusammenhang.

[28] God. Guil. Leibnitii Opera philosophica ... Berolini 1840, p. 1, S. 746—47

Auch eine andere Vorstellung, die Fernwirkung durch das Vakuum, war nicht mit dem Wesen der klassischen Mechanik verbunden. Aber mit ihr war schwerer fertig zu werden als mit dem ersten Anstoß. Die kinetische Gravitationstheorie hat niemals solche Bestimmtheit und solche wissenschaftliche Bedeutung gewonnen wie die kosmogonischen Hypothesen. Aber es hat immer Tendenzen in der Wissenschaft gegeben, die Gravitation mit Hilfe des Äthers zu erklären — auch bei Newton, wie wir gesehen haben. Das hinderte ihn jedoch nicht daran, Gott zuweilen die Übertragung der Gravitation zuzuschreiben. Adam Smith hat einmal geschrieben, daß kein Volk auf der Erde einen Gott der Schwerkraft habe. Die Schwerkraft wurde tatsächlich immer als rationale Kraft angesehen. Jedoch in den theologischen Exkursen der „Mathematischen Prinzipien" wurde solch ein „Gott der Schwerkraft" eingeführt.

Im 18. Jahrhundert standen der erste Anstoß und die Fernwirkung im Zentrum der wissenschaftlich-philosophischen Auseinandersetzungen. Im 20. Jahrhundert gewannen andere dunkle Flecken auf dem Gewand der Newtonschen Lehre aktuelle Bedeutung: die unendlichen Gravitationskräfte, die für ein unendliches Weltall galten, die zufällige Identität von träger und schwerer Masse und die Periheldrehung des Merkur. Nur eine neue Gravitationstheorie, die allgemeine Relativitätstheorie, vermochte auf diese „verfluchten Fragen" der alten Mechanik Antwort zu geben. Im 18. Jahrhundert aber war das Problem des ersten Anstoßes für das Wesen des wissenschaftlichen Weltbildes besonders wichtig. Gerade in diesem Punkte erwies sich ein unbewegtes, unhistorisches und teilweise sogar antihistorisches Weltbild als unzureichend.

Die Unveränderlichkeit der Natur war in der Weltanschauung von Linné und Newton mit der Methode und dem Stil der Newtonschen Ideen verbunden. Für die cartesische Physik war das Bestreben kennzeichnend, die *Entstehung* komplizierter Erscheinungen aus homogener Materie, die durch die unzerstörbare Bewegung hervorgebracht war, zu zeigen. Für Newton und seine Schule ist dagegen die *Systematisierung* der Erscheinungen charakteristisch, ihre Einteilung in bestimmte Arten und Abschnitte, ohne eine Erscheinung aus der anderen abzuleiten. Der Cartesianer fragte so lange nach dem „Warum", bis er zu einer einfachen mechanischen Verschiebung, zu einem Stoß, einem Schlag, zur Wechselwirkung der qualitätslosen Materieteile gekommen war. Die Anhänger Newtons wollten kein kinetisches Bild zeichnen und beschränkten sich auf die Zuordnung einer Erscheinung zu einer anderen, gleichartigen. Deshalb steht Newtons „Physik der Prinzipien" im engen Zusammenhang mit den systematisierenden Tendenzen in der Wissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts.

Die rein dynamische Forschung, die „Physik der Prinzipien", die Reduzierung der Wissenschaft auf die Aufstellung mathematischer Gleichungen, das Abgehen von der Analyse kinetischer Ursachen zusammen mit Verabsolutierung, Außerachtlassung des relativen Charakters, führt zu dem für das 18. Jahrhundert bezeichnenden Gedanken von der Unveränderlichkeit des Weltalls.

Der theologische Abschluß der „Mathematischen Prinzipien" und der gesamten Weltanschauung Newtons und Linnés hat die klassische Mechanik nicht daran gehindert, in der Wissenschaft wie in der sonstigen materiellen und ideellen Ent-

wicklung der Gesellschaft eine zutiefst revolutionäre Rolle zu spielen. In der Wissenschaft war das exakte System, das gleichzeitig ungelöste Probleme und damit Ausgangspunkte der späteren Wissenschaft enthielt, Grundlage weiterer Schritte. Gleiches gilt für das wissenschaftliche Weltbild, das mit einer gegenüber der voraufgegangenen Zeit unvergleichlichen Exaktheit und Eindeutigkeit erarbeitet worden war und sich auf verhältnismäßig viele eindeutige und exakte Experimente stützte. Im 18. Jahrhundert erwies Newtons Mechanik ihren praktischen Wert während der industriellen Revolution in England, und für Voltaire waren die „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" ein Kampfmittel gegen die Kirche, und damit ein Mittel, das die Französische Revolution vorbereitete.

Im Vorwort zur zweiten Ausgabe der „Mathematischen Prinzipien" hatte Cotes geschrieben: „*Newtons* ausgezeichnetes Werk wird daher der sicherste Schutz gegen die Angriffe der Gottlosen sein, und nirgends wird man glücklicher als aus diesem Köcher Geschosse gegen die gottlose Schar entnehmen können."[29] Aber entgegen den theologischen Tendenzen in Newtons Weltanschauung, entgegen den Versuchen, die „Mathematischen Prinzipien" zu einem „Köcher" der theologischen Apologetik zu machen, erwies der lebendige Inhalt der sich entwickelnden Wissenschaft schon in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts seine antitheologische Zielrichtung. Im Jahre 1733 erschienen Voltaires „Philosophische Briefe" (auch „Englische Briefe" genannt), in denen er die „Mathematischen Prinzipien" so scharfsinnig und kämpferisch popularisierte, daß sie auf Beschluß des Pariser Parlaments auf dem Scheiterhaufen verbrannt wurden. Die erste Periode in der Entwicklung der neuen Naturwissenschaft begann mit dem revolutionierenden Buch des Kopernikus und wurde durch den „göttlichen Anstoß" vollendet. Die neue Periode wurde mit Lobpreisungen englischer Theologen auf die „Mathematischen Prinzipien" eingeleitet, aber nach einigen Jahrzehnten wurde ein die „Mathematischen Prinzipien" popularisierendes Buch auf das Drängen französischer Theologen hin verbrannt. Allerdings hat Newtons Lehre tatsächlich nur dort entschieden antitheologisch gewirkt, wo der Kampf progressiver Denker gegen die Kirche schon weit fortgeschritten war.

In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurde Newtons Lehre in der Weltanschauung der französischen Materialisten mit den Elementen der cartesischen Physik vereinigt, die sich als richtig erwiesen hatten. Diese Vereinigung benutzten die Enzyklopädisten als Kampfmittel gegen Thron und Altar. Eine neue Periode in der Entwicklung der Wissenschaft begann.

5. Dynamik und Atomistik

Im 18. und 19. Jahrhundert wurde ein Weltbild aufgebaut, in dem die diskreten Körper nicht dem Vakuum — dem neutralen einfachen „Nichtsein" Demokrits —, sondern einer bestimmten physikalischen Realität gegenübergestellt

[29] I. Newton, Mathematische Principien der Naturlehre, a. a. O., S. 19.

waren, welche die Bezeichnung *Feld* erhielt. Heute, da die klassische Gegenüberstellung von Stoff und Feld durch die Auffassung von den Teilchen als Elementen des Feldes abgelöst worden ist, können wir die Entwicklung dieses Fundamentalbegriffs deutlich verfolgen. Anfangs figurierte er in der Wissenschaft als formale Bezeichnung gewisser Größen, welche das Verhalten diskreter Teilchen im Vakuum bezeichneten. Dann bildete sich die Vorstellung vom kontinuierlichen *Medium* heraus, welches das Verhalten der in ihm enthaltenen Körper bestimmte. Dieses kontinuierliche Medium erwies sich im 20. Jahrhundert als ungeeignet, um als Bezugskörper für die sich in ihm bewegenden Körper zu dienen. Zu gleicher Zeit wurde die Idee des kontinuierlichen Feldes bezweifelt und eingeschränkt. Wir behandeln hier die *Vorgeschichte* der Lehre vom Feld als einem kontinuierlichen Medium, in dem Teilchen eingeschlossen sind, die nicht nur Ausdehnung, sondern auch dynamische Eigenschaften besitzen.

Newtons Dynamik hatte auf die Vorstellung vom Teilchen wesentlichen Einfluß. Die Identität des Teilchens mit sich selbst wird nicht nur durch die Erhaltung von Größe und Form dargestellt (wie in den atomistischen Vorstellungen des 17. Jahrhunderts, die aus dem Altertum stammten), sondern auch durch die Erhaltung der Masse als eines Koeffizienten, der die Größe der Kraft mißt, die auf das Teilchen im gegebenen Punkt bei gegebener Feldstärke wirkt. Die dynamische Charakteristik der Teilchen ist ein entscheidender neuer Schritt in der Entwicklung der Atomistik. Seine Bedeutung läßt sich allerdings bei einer retrospektiven Einschätzung in unserer Zeit leichter verstehen, da die Kennzeichnung des Feldes ein untrennbares Wesensmerkmal des Teilchens geworden ist.

Die Atomistik des 17. Jahrhunderts vermochte über die cartesische Geometrisierung des Stoffes nicht hinauszukommen, wenngleich sie von der cartesischen Identifizierung von Stoff und Raum absah. Der Stoff unterscheidet sich vom Raum, der leer sein kann, aber *worin* besteht dieser Unterschied?

Bei Gassendi und Boyle werden die Atome durch Größe und Form bestimmt, d. h. durch räumliche Prädikate. Was aber unterscheidet eigentlich den gefüllten vom leeren Raum? Auf diese Frage ließ sich ebenso schwer antworten wie auf die nach dem Unterschied eines Körpers gegenüber dem ihn umgebenden Körper in der Physik Descartes'.

Bei der Suche nach einer Antwort legte die Wissenschaft nach Newton und teilweise schon zu seiner Zeit den Teilchen dynamische Eigenschaften bei. Dabei wurde dieser notwendige Erkenntnisschritt verabsolutiert, und man gelangte zur Vorstellung von nicht ausgedehnten dynamischen Zentren und von der Ausdehnung als einer sekundären Eigenschaft der Körper, die sich aus primären dynamischen Eigenschaften ergibt.

Nach Leibniz ist es unmöglich, dynamische Bestimmungen der Körper aus der Ausdehnung abzuleiten. Besitzt die Materie nur Ausdehnung, so können ihre Eigenschaften nur geometrisch sein. Die Materie kann geteilt werden, kann sich bewegen, aber Bewegung kann weder entstehen noch auf einen anderen Körper übertragen werden, wenn der Körper mit dem Raum identisch ist und nur geometrische Eigenschaften aufweist. Ein Körper kann dann auch keine Masse besitzen, die gegen äußere Impulse Widerstand leistet. Deshalb verwirft Leibniz

die cartesische Identifizierung von Materie und Raum. Nach seiner Auffassung wird bei dieser Identifizierung die absolute Unterschiedlichkeit und Homogenität der Raumteilchen in die Ununterscheidbarkeit und Homogenität der Materie verwandelt. Damit ist die Möglichkeit aufgehoben, einen Körper von einem anderen und ein Ereignis von einem anderen zu unterscheiden.

Am 18. Juni 1691 äußerte sich Leibniz in einem Schreiben an den Herausgeber des „Journal des Savans" folgendermaßen: „Ich bin nach wie vor damit einverstanden, daß auf natürliche Weise jeder Körper ausgedehnt ist und daß es keine Ausdehnung ohne Körper gibt; nichtsdestoweniger dürfen die Begriffe des Ortes, des Raumes oder der bloßen Ausdehnung nicht mit dem Begriff der Substanz verwechselt werden, der außer der Ausdehnung auch den Widerstand, also Tätigkeit und Leiden, in sich schließt."[30]

In Wirklichkeit handelt es sich hier um die Trägheit. Ohne diese Eigenschaft könnte ein Körper einerseits einem Stoß keinen Widerstand entgegensetzen und andererseits keinen Stoß vornehmen. Die Ununterscheidbarkeit der Raumteilchen (des einen „hier" und des anderen „dort") führt zur Ununterscheidbarkeit der Zeit (des einen und des anderen „jetzt").

Die Ausdehnung eines Körpers selbst hat nach Leibniz keinen Sinn, wenn er keine dynamischen Eigenschaften besitzt. Ein Körper äußert seine Ausdehnung durch seine Undurchdringlichkeit. Descartes schrieb, wie wir gesehen haben, die Undurchdringlichkeit den Raumteilchen selbst zu und „physikalisierte" somit den Raum. Leibniz hielt dagegen die Undurchdringlichkeit für einen Ausdruck der dynamischen, nichträumlichen Eigenschaften des Körpers. Der Raum ist keine substantielle Kraft, die Ausdehnung ist Ergebnis der aktiven dynamischen Existenz des Körpers.

In Leibniz' Arbeiten verbindet sich die Konstatierung tatsächlicher Schwierigkeiten der cartesischen Physik mit einer Verteidigung der Theologie. Die mechanische Naturerklärung wird nach Leibniz' Meinung widerspruchsfrei und gleichzeitig für die Theologie ungefährlich, wenn statt der Geometrisierung der Materie die Ausstattung der Materie mit dynamischen als den einzig substantiellen Eigenschaften Grundlage dieser Erklärung wird. Leibniz schreibt: „Diese Überlegungen scheinen mir nicht nur für die Erkenntnis des Wesens der ausgedehnten Substanz wichtig zu sein, sondern auch dafür, um nicht in der Physik die höchsten und nichtmateriellen Prinzipien zum Schaden der Frömmigkeit zu vernachlässigen. Wenngleich ich überzeugt davon bin, daß sich in der Körperwelt alles auf mechanischem Wege vollzieht, so glaube ich dennoch, daß die höchsten Prinzipien der Mechanik, d. h. die ersten Bewegungsgesetze, einen höheren Ursprung als den haben, welchen die reine Mathematik zu geben vermag. Wäre dies besser bekannt und würde dies mehr beachtet, so hätten, wie ich glaube, viele fromme Menschen keine solche schlechte Meinung von der Korpuskularphilosophie, und die neuen Philosophen würden die Erkenntnis der Natur mit der Erkenntnis ihres Schöpfers besser verbinden."[31]

[30] God. Guil. Leibnitii Opera philosophica, instr. J. E. Erdmann, p. 1, Berolini 1840, S. 114.
[31] Ebenda.

Leibniz meint, daß die Ausdehnung Ergebnis des Wirkens einer dynamischen Substanz, genauer gesagt, einer Menge von Substanzen ist. Leibniz bezeichnete sie im Jahre 1697 als *Monaden*. Die Monaden sind keine geometrischen Punkte. Letztere setzten die Existenz des Raumes voraus, die Monaden bilden hingegen nach Leibniz selbst den Raum. Sie sind auch keine Atome, denn die Atome sind ausgedehnt. Raum und Zeit werden bei Leibniz mit phänomenologischen Kategorien erklärt. Der Raum ist demnach die Ordnung der in ein und demselben Moment beobachteten Erscheinungen, die Zeit ist die Ordnung der aufeinanderfolgenden Erscheinungen. Die raumzeitliche Welt wird infolge mechanischer Ursachen verändert. Die Monaden nehmen als nicht ausgedehnte Wesen auf die physikalischen Prozesse keinen Einfluß. Die Übereinstimmung zwischen der kausalen raumzeitlichen Welt und der Welt der geistigen Wesenheiten wird durch die prästabilierte Harmonie hergestellt, welche bei den Leibnizepigonen und vor allem bei Christian Wolff zur flachen Teleologie wurde.[32]

Wir sehen keinen Anlaß dafür, Leibniz in den Bereich der sehr gekünstelten und schwierigen Konstruktionen der Monadologie zu folgen. Die Naturwissenschaftler des 18. Jahrhunderts benutzten die Monadenlehre. Sie verstanden unter den Monaden ausdehnungslose Kraftzentren. Wie sich Leibniz auch bemühte, die Monaden im metaphysischen Reich der geistigen Wesenheiten anzusiedeln — in der Wissenschaft wurden ausdehnungslose dynamische Atome angenommen, die sich bald als Ausgangspunkt der eigentlich atomistischen Vorstellungen erwiesen, die mit ausgedehnten Teilchen operierten.

Hier wirkten nicht nur echte historische Prinzipien, sondern es wurde auch die innere Logik der Leibnizschen Konzeption zum Ausdruck gebracht. Leibniz wollte das ganze komplizierte cartesische System der kinetischen Erklärung einzelner Naturprozesse von neuen Prinzipien aus aufbauen, die nicht mehr kinetisch, sondern dynamisch waren. Er wollte dabei aus ihnen philosophische Schlußfolgerungen im Geiste des objektiven Idealismus, der Teleologie und sogar der Theologie ableiten. Aber die innere Logik der von Leibniz dem Cartesianismus entgegengesetzten mechanischen und mathematischen Begriffe ging über das Leibnizsche philosophische Programm hinaus und führte letzten Endes zur Atomistik. Wir können direkte Zusammenhänge zwischen den von Leibniz eingeführten Kategorien und der wissenschaftlichen Arbeit der Denker des 18. Jahrhunderts feststellen, die in der Epoche des unmittelbaren Angriffs auf die Teleologie heranwuchsen und selbst an ihm aktiven Anteil nahmen.

Wir begegnen hier erneut dem für die moderne historische Analyse charakteristischen Phänomen, daß sich dort *Fragen* ergeben, wo man früher nur *Antworten* sah. Newtons Beispiel zeigte das deutlich.

Seine Ideen schienen den Wissenschaftlern der folgenden zwei Jahrhunderte noch endgültiger zu sein als die Gedanken des Aristoteles dem Mittelalter. Wir wissen heute, daß sich der lebendige Strom von Forschungen und Vorforschungen auch durch das Werk des Aristoteles Bahn brach. Dieser Strom geht durch die

[32] Vgl. F. Engels, Dialektik der Natur, Einleitung, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, a. a. O., S. 315.

gesamte Geschichte der Wissenschaft. In allen großen wissenschaftlichen Theorien, selbst in den bedeutendsten und in den kanonisiertesten, begegnen wir dem „Faustischen Geist“, den Johann Wolfgang von Goethe mit tiefem Verständnis für das Wesen des wissenschaftlichen Schaffens dem philisterhaften „Geist Wagners“ gegenüberstellt.

Fragen an die Zukunft finden sich in der Wissenschaft sehr häufig. Nur eine retrospektive Analyse macht ihren Problemcharakter und ihre tatsächliche historische Bedeutung deutlich. Ein Beispiel für den Unterschied zwischen eigenen Schlußfolgerungen eines Wissenschaftlers und dem wirklichen Sinn der von ihm eingeführten Begriffe gibt gerade Leibniz’ Dynamismus, die „kontinentale“ Linie des Dynamismus des 17. und 18. Jahrhunderts. Wir wissen heute, daß Leibniz’ Ideen an die Zukunft gerichtete Fragen bargen, auf die die Wissenschaft erst im 19. Jahrhundert zu antworten vermochte.

Die atomistischen Vorstellungen des 18. Jahrhunderts waren sehr eng mit der weiteren Entwicklung der Atomistik verbunden. Sie gingen von der Ausdehnung der Teilchen und dem primären Charakter dieser Ausdehnung aus. Die Position Lomonossovs ist hierbei sehr bezeichnend. Er vermochte dem Gedanken über den sekundären Charakter der Körperausdehnung und ihrer Herauslösung aus dem Sein der nicht ausgedehnten Körper nicht zuzustimmen. Die Ausdehnung ist die Grundeigenschaft der Körper, und es ist unmöglich, eine Begründung für diese Eigenschaft zu suchen, sie aus anderen abzuleiten.[33]

Lomonossovs Atomistik steht im Gegensatz zur Auffassung von Leibniz und Wolff. Aber sie bezeichnet keine Rückkehr zu den Auffassungen des 17. Jahrhunderts, zu den Theorien von Gassendi und Boyle. Die Atome werden bei Lomonossov durch prinzipiell meßbare dynamische Merkmale, durch Trägheit und Masse gekennzeichnet. Deshalb vermochte Lomonossov vom Gedanken der Erhaltung der Zahl der Atome zu dem der Erhaltung der Masse zu gelangen. Er maß der Veränderung der Wechselwirkung der Atome beim Übergang von einer Konfiguration zu einer anderen große Bedeutung bei. Im Unterschied zu Boyle war Lomonossov bei der Benutzung hypothetischer Konstruktionen sehr vorsichtig. Er schrieb den Atomen zwar Vertiefungen und Erhöhungen zu, die ihre Oberfläche uneben machen, aber bei einer Reihe von physikalischen und chemischen Problemen erklärte er die Eigenschaften der Körper und die Veränderungen dieser Eigenschaften nicht durch Form und Größe, sondern durch die Konfigurationen und die Veränderungen der Konfigurationen der Atome. Dementsprechend figurieren in den Modellen nicht primär Form und Maß der Atome, sondern ihre Lage und Geschwindigkeit.

Die Atomistik ermöglichte die Aufgabe der Theorie Newtons vom „ersten Anstoß“.

Immanuel Kant wendet sich in seiner „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ gegen den Gedanken eines göttlichen Anstoßes, durch den die Welt in Gang gesetzt wird, sich jedoch im weiteren unter dem Einfluß der Trägheit

[33] Vgl. M. W. Lomonossow, Betrachtungen über die Ursache der Wärme und Kälte, in: Ausgewählte Schriften in zwei Bänden, Bd. I, Naturwissenschaften, Berlin 1961, S. 147ff.

und der wechselseitigen Gravitation der Körper bewegt. Newton hatte geschrieben, die Bewegung der Planeten sei die Grenzscheidung, „welche die Natur und den Finger Gottes, den Lauf der eingeführten Gesetze der ersteren und den Wink des letzteren voneinander scheidet“. Kant bezeichnete diese Auffassung als eine „vor einen Philosophen ... betrübte Entschließung“[34]. Er wollte eine kausale Erklärung der Anfangsbedingungen der Bewegung der Himmelskörper finden. Im Sonnensystem gibt es für ihn keine Kräfte, die einen ersten Anstoß erklären. Hieraus ergibt sich lediglich, daß eine solche Kraft früher existiert hat. Sie hat in der Attraktion und Repulsion der Moleküle des Urnebels bestanden. Attraktion und Repulsion wurden nach Kant letzten Endes durch Wirbelbewegungen hervorgerufen. Weiter wird die Theorie von der Drehung der Nebel entwickelt. Die Drehung hatte dazu geführt, daß sich einige Nebel in Planeten und der zentrale Teil in die Sonne umwandelten. Das Sonnensystem gehört zum umfassenderen Milchstraßensystem, das sich in analoger Weise herausbildete. Das Milchstraßensystem ist wiederum Bestandteil eines noch umfassenderen Systems. Es gibt eine unendliche Hierarchie solcher Systeme. Die Geschwindigkeit der Himmelskörper um die Gravitationszentren verringert sich, schließlich fallen sie in den Zentralkörper, und diese Zusammenstöße führen zur Bildung neuer Nebel. Daher bezeichnet Kant das Weltall als den „Phönix der Natur, der sich nur darum verbrennet, um aus seiner Asche wiederum verjüngt aufzuleben“[35].

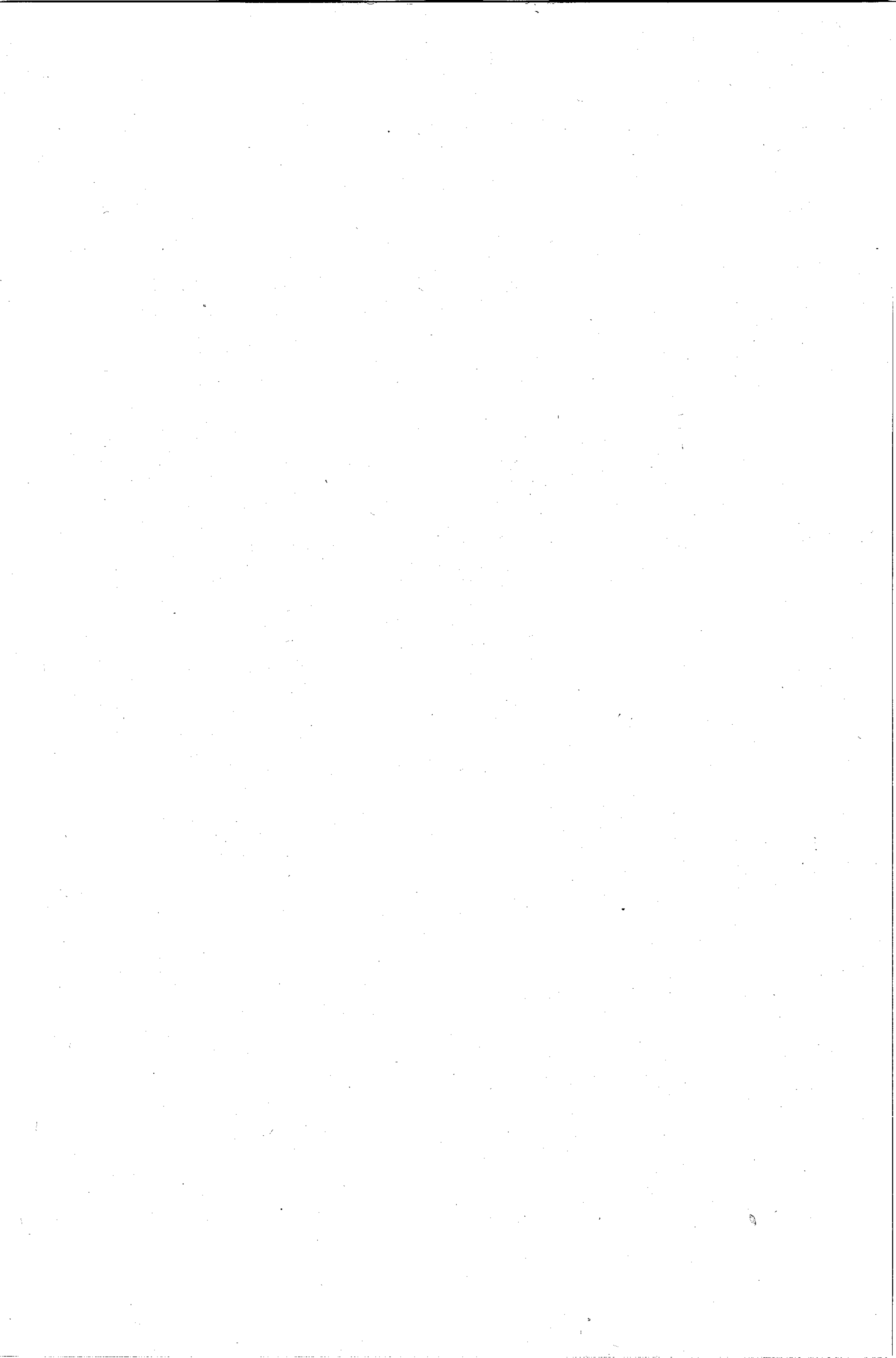
Laplace äußerte 1796 ähnliche Auffassungen, wobei er seine Anschauungen vornehmlich auf mathematisch-physikalischer Grundlage aufbaute. Die Kant-Laplace-Nebularhypothese war für lange Zeit die verbreitetste kosmogonische Theorie. Ihre schwache Stelle war vor allem die willkürliche Ableitung von Drehbewegungen aus den Zentralkräften der molekularen Attraktion und Repulsion. Die Zentralkräfte vermochten die Drehungen der Nebel nicht hervorzurufen. Immanuel Kant postulierte, daß die Anfangsbedingungen der makroskopischen Bewegungen der Himmelskörper durch Molekularbewegungen geschaffen wurden, aber er vermochte zu seiner Zeit nichts Bestimmtes über die Besonderheiten der Molekularbewegungen zu sagen. Es war eine geniale Absicht, die Theorie des ersten Anstoßes durch atomistische Vorstellungen erklären zu wollen. Aber sie konnte im 18. Jahrhundert vor allem deshalb nicht eindeutig verwirklicht werden, weil nichts über die spezifischen Gesetzmäßigkeiten bekannt war, die die Molekularbewegung von den Bewegungen makroskopischer Körper unterscheiden. Es muß übrigens gesagt werden, daß auch im 19. Jahrhundert, als die statistischen Gesetzmäßigkeiten der Molekularphysik bekannt wurden, die kosmogonischen Probleme nicht eindeutig gelöst werden konnten. Sie sind es auch bis heute nicht. Denn dieses Problem steht nicht nur mit den Gesetzmäßigkeiten der Molekularbewegungen im Zusammenhang, sondern auch mit spezifischen Gesetzmäßigkeiten, die Bewegung und Umwandlung der Atome, der Atomkerne und Elementarteilchen bestimmen. Im 18. Jahrhundert gab es noch keine klar umrissenen Vor-

[34] I. Kant, Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, Berlin 1955, S. 179–180.
[35] Ebenda, S. 158.

stellungen von ihren spezifischen Bewegungsformen; sie existierten nur im Keim als mögliche physikalische Interpretation bereits erarbeiteter mathematischer Begriffe.

In den Arbeiten von Laplace offenbarte die Atomistik ihre für das 18. Jahrhundert und den Beginn des 19. Jahrhunderts außerordentlich wichtige gedankliche Funktion der Begründung eines universellen mechanischen Determinismus. Im Prinzip werden alle Prozesse im Weltall auf die Bewegung von Teilchen reduziert, wobei diese von ihrer Lage und Geschwindigkeit abhängt. Dieser Gedanke gab Laplace die Grundlage, nicht nur Napoleon I. auf dessen Frage, warum in seinem „Weltsystem" nichts über Gott gesagt werde, zu antworten, er bedürfe dieser Hypothese nicht, sondern auch eine noch bekanntere Bilanz des Jahrhunderts der Vernunft zu ziehen. Laplace schrieb, daß eine Intelligenz, die für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennen würde, mit absoluter Prägnanz alle folgenden und vergangenen Ereignisse zu bestimmen vermöge: kosmische, physikalische, chemische bis hin zu den historischen Schicksalen der Menschheit und zu den konkreten historischen Fakten der Zukunft.[36]

[36] Vgl. P. S. de Laplace, Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit, Leipzig 1932, S. 1f.



IV. DIE ANALYTISCHE MECHANIK UND DAS PRINZIP DER KLEINSTEN WIRKUNG

1. Die Wissenschaft im 18. und 19. Jahrhundert

Die Wissenschaft des 18. Jahrhunderts besitzt bereits ein einheitliches Weltbild. Ihm liegt eine Eindeutigkeit und Absolutheit beanspruchende Erklärung aller Naturerscheinungen durch die Bewegung und Wechselwirkung diskreter Körper zugrunde, die durch die Differentialgleichungen der Bewegung (als Ausgangspunkt dient das zweite Gesetz Newtons) und die Feldgleichungen (die Gravitation bildet den Prototyp) dargestellt werden.

Die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts wird dagegen durch die Erkenntnis charakterisiert, daß komplizierte Prozesse nicht auf die Bewegung und Wechselwirkung von Teilchen zurückgeführt, aber auch nicht von jener Bewegung und Wechselwirkung der Teilchen getrennt werden können, die durch die klassischen Gleichungen beschrieben werden. Wenn wir von „der Wissenschaft des 18. und 19. Jahrhunderts" sprechen, so bezeichnen wir damit vor allem den Übergang von der dem 18. Jahrhundert eigenen klassischen mechanischen Auffassung zu der dem 19. Jahrhundert zuzurechnenden Konzeption einer vielschichtigen Welt mit qualitativ unterschiedlichen Bewegungsformen. Dieser Übergang wäre nicht organisch, wenn in den Theorien des 18. Jahrhunderts nicht Probleme und Widersprüche vorhanden gewesen wären, die nur durch die Annahme komplizierter nichtmechanischer Prozesse lösbar waren.

Für die Theorien des 18. Jahrhunderts war die Eindeutigkeit, die strenge Abhängigkeit einer Erscheinung von einer anderen charakteristisch. Die Wissenschaft zwängte alle Erscheinungen in Ursache-Wirkungs-Ketten und riß sie somit aus ihrem allgemeinen und unendlichen Zusammenhang. Sie interessierte sich nach den Worten von Schiller für die Längsverbindungen und ließ dabei die unzähligen Querverbindungen außer acht, die die einfache Abhängigkeit komplizieren. Im Laufe der Zeit erfaßte die Wissenschaft auch diese Querverbindungen, versuchte aber, sie ebenfalls in einfache Längsverbindungen aufzulösen. Als Beispiel hierfür kann Newtons Gravitationstheorie und seine Vorstellung über die Störungen dienen.

Newton bezeichnete das Gesetz, wonach sich zwei Körper gegenseitig mit einer Kraft anziehen, die proportional dem Produkt ihrer Masse und umgekehrt proportional dem Quadrat ihrer Entfernung ist, als Grundlage des gesamten Weltalls. Aber diese Beziehung ist eine Abstraktion: Jeder Körper ist der Gravitation einer unendlichen Zahl anderer Körper ausgesetzt. Die klassische Mechanik geht deshalb von dem abstrakten Bild zweier Körper zu dem konkreteren Fall

dreier Körper über. Sie betrachtet den dritten Körper als Quelle einer Störung, die die ursprünglich einfache Aufgabe kompliziert. Aber auch zwei Körper ergeben bereits ein relativ kompliziertes Bild. Die ursprüngliche Abstraktion besteht in der Bewegung eines Körpers im leeren Raum. Er bewegt sich geradlinig und gleichförmig, seine Koordinaten sind lineare Funktionen der Zeit. Jeder neue Schritt in der Entwicklung des mechanischen Weltbildes behielt diese lineare Abhängigkeit der räumlichen Größen von der Zeit bei. Eine solche Linearisierung wird durch den Übergang zu relativ kleinen Bereichen erreicht. In der ursprünglichen Vorstellung eines sich bewegenden Körpers — der höchsten Abstraktion der mechanischen Naturwissenschaft — ist die Lage des Körpers diejenige räumliche Größe, die linear von der Zeit abhängt. Dann erinnerte sich die Naturwissenschaft in der Person Newtons an die Gesetze Keplers, an die Beschleunigung der Himmelskörper. Sie setzte sie mit der Beschleunigung von Körpern auf der Erde in Beziehung und ging vom ersten Gesetz der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" zum zweiten über. Beschleunigte Bewegung war aber vorerst nur gleichförmig beschleunigte Bewegung. Nach dem heutigen Sprachgebrauch ging es um ein homogenes Kraftfeld, in dem die Geschwindigkeit als lineare Funktion der Zeit auftritt. Zunächst betrachtete man also die Koordinate als lineare Funktion der Zeit, dann die Geschwindigkeit, die Beschleunigung usw.

Der lineare Charakter der Beziehung zwischen den Endgrößen entspricht der Wirklichkeit lediglich in dem Maße, in dem eine abstrakte Isolierung der zu betrachtenden Größen aus dem unendlichen Zusammenhang der Erscheinungen im Weltall zulässig ist. Die Vorstellung einer geradlinigen und gleichförmigen Bewegung durch Trägheit entspricht der Realität, solange man Kraftfelder vernachlässigen kann. Das Bild einer gleichförmig beschleunigten Bewegung gilt, solange homogene Felder wirken. Die mathematische Vorstellung demonstriert deutlich die Bedingtheit jedes Schrittes der Abstraktion. Oft wird aber die Erkenntnis verabsolutiert und die bedingte Abstraktion zum absolut genauen Äquivalent der Realität erhoben.

Die Vorstellung von einer konstanten Abhängigkeit zweier Größen, die bei unbegrenztem Anwachsen oder Abnehmen dieser Größen erhalten bleibt, übte einen großen Einfluß auf Wissenschaft und Kultur des 18. Jahrhunderts aus. Der Unterschied zwischen dem rationalistischen „linearen" Denken des 18. Jahrhunderts und den Gedankengängen des 19. Jahrhunderts, die die unendliche Mannigfaltigkeit der Welt berücksichtigten, wurde nicht nur in Wissenschaft und Philosophie sichtbar, sondern auch in der ganzen Kultur dieser zwei Jahrhunderte, u. a. in der schöngeistigen Literatur und ebenfalls sogar im Alltagsdenken der Menschen.

Die absolute Eindeutigkeit erwies sich bald als Illusion. Goethes „Faust" war der künstlerische Ausdruck eines neuen, dem 18. Jahrhundert unbekannten Gefühls der unendlichen Kompliziertheit der realen Welt, der Existenz nichtlinearer Abhängigkeiten, der Wechselwirkung, der veränderlichen Größen, der unendlich vielen „transversalen" Verbindungen. Goethes Stellungnahme gegen Newton ließ eine neue Naturbetrachtung erkennen. Noch niemals war mit einer solchen Energie und künstlerischen Kraft der Auffassung von einer vielfältigen

Welt Ausdruck verliehen worden. Goethe bemühte sich, die Welt in ihrer unmittelbaren Kompliziertheit ohne Aufteilung in abstrakte Ketten linearer Abhängigkeit zu erfassen. Er protestierte gegen die Grenzen, die eine Einzelaufgabe von der anderen trennen, gegen eine abstrakt-theoretische oder experimentelle Aufgliederung der Natur. Goethe hielt sowohl die theoretische Analyse als auch das Experiment für antropomorph. Sie führen seiner Meinung nach Begriffe in die Naturwissenschaft ein, die dem Wesen der Natur nicht entsprechen. „Grau, teurer Freund, ist alle Theorie und grün des Lebens goldner Baum" — das ist das Grundprinzip der Weltanschauung Goethes. Die ursächliche Erklärung der Erscheinungen erfaßt nur einige ihrer Seiten und löst die Erscheinungen in lange Ketten von Ursachen und Wirkungen auf. Aber in ihnen verlieren sich nach Goethe weitere Beziehungen zwischen den Erscheinungen, die nicht in die erhaltenen Kausalreihen eingehen. Um die Natur nicht durch von außen hineingetragene Abstraktionen zu entstellen, muß man die Wirklichkeit so erfassen, wie sie sich durch die Anschauung ergibt, d. h. in ihrer konkreten Vielseitigkeit. Goethe verabsolutierte jedoch keineswegs seinen Standpunkt. Er erkannte die Notwendigkeit der theoretischen Durchdringung der Natur an, aber der Gedanke an ihre Relativität begrenzt, zügelt und entschärft die Abstraktion.

Der in die Natur verliebte Dichter sah vieles, was der Aufmerksamkeit der Berufsgelehrten zum Teil entgangen war. Die Arbeiten Goethes auf dem Gebiete der Biologie waren für ihre Zeit von großer Bedeutung. Goethes „Faust" beeinflußte das wissenschaftliche Denken dieser Epoche allerdings bedeutend stärker als seine naturwissenschaftlichen Arbeiten. Natürlich konnte man in der weiteren Naturforschung nur mit Hilfe abstrakter Schemata zielgerichtet in die Gesetzmäßigkeiten der Natur mit ihrem Reichtum an Elementen und vielfältigen Beziehungen eindringen.[1] Deswegen konnten auch die Ideen Goethes die grundsätzliche Richtung der Wissenschaftsentwicklung vom 17. bis zum 19. Jahrhundert, den Aufstieg von den Abstraktionen der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" zu immer konkreteren Formen nicht aufhalten. Der Kampf gegen eine Dogmatisierung der Abstraktion beschleunigte die Entwicklung der Wissenschaft.

In der vormarxistischen Philosophie bildete die Dialektik Hegels den Höhepunkt der dem 19. Jahrhundert eigenen Vorstellungen von der unendlichen Kompliziertheit und Widersprüchlichkeit der Welt, von der logischen und historischen Begrenztheit der Abstraktionen.

Die dialektische Philosophie in jener von Hegel stammenden systematischen Form enthielt, ungeachtet des idealistischen Systems, revolutionäre gesellschaftliche Schlußfolgerungen und ein revolutionäres Wissenschaftsprogramm. Die pedantischen, dunklen und unbeholfenen Seiten Hegels verdeckten allerdings vielfach die revolutionären Konsequenzen.[2] Aber der Einfluß einer dialektischen Philosophie wäre nicht so spürbar gewesen, wenn die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts im Ergebnis der Weiterentwicklung und praktischen Anwendung

[1] Vgl. K. Marx, Einleitung zur Kritik der Politischen Ökonomie, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 13, Berlin 1961, S. 631ff.

[2] Vgl. F. Engels, Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 21, Berlin 1962, S. 268–269.

naturwissenschaftlicher Erkenntnisse des 18. Jahrhunderts nicht auch ihrerseits zu neuen Vorstellungen gekommen wäre.

In seinem Artikel „Die Lage in England. Das 18. Jahrhundert" (1844) verweist Engels auf folgendes: „... die Wissenschaften hätten im 18. Jahrhundert ihre wissenschaftliche Form angenommen und infolgedessen einerseits an die Philosophie, andererseits an die Praxis angeknüpft. Das Resultat ihrer Anknüpfung an die Philosophie war der Materialismus (der ebensosehr Newton wie Locke zu seiner Voraussetzung hat), die Aufklärung, die französische politische Revolution. Das Resultat ihrer Anknüpfung an die Praxis war die englische soziale Revolution."[3]

Die engen Beziehungen zwischen der mechanischen Naturwissenschaft und der Philosophie waren für die vorrevolutionären geistigen Bewegungen in ganz Europa charakteristisch. Nachdem Le Roy der Physik Descartes' seine Metaphysik entgegengestellt hatte, wandte sich in Frankreich Condillac mit dem Sensualismus Lockes gegen die gesamte Metaphysik des 18. Jahrhunderts.[4] Der englische Materialismus veränderte sich auf französischem Boden. Er wurde zur Waffe gegen Absolutismus und Kirche. In dieses Waffenarsenal wurde auch die Mechanik Newtons einbezogen. Als Voltaire die Newtonsche Weltanschauung in Frankreich propagierte, erfaßten sowohl Kirche als auch Regierung sehr schnell ihren sozialen Gehalt. Voltaires „Elemente der Philosophie Newtons"[5] konnten, obwohl sie die politischen und religiösen Dogmen nicht direkt berührten, in Frankreich nicht gedruckt werden. Das Interesse weiter Kreise an den Gedanken Newtons war Ausdruck ihrer Verbindung mit den gesellschaftlichen Bewegungen.

Aber nicht der Deist Voltaire, sondern die materialistischen Philosophen, die Naturwissenschaftler und Mathematiker entkleideten die Newtonsche Weltanschauung ihrer theologischen Verbrämung. Als die klassische Mechanik in den Händen von Lagrange zu einer rein mathematischen Disziplin wurde, hatte das zweierlei Bedeutung. Aus der Mechanik verschwanden nicht nur die kinetischen Hypothesen, sondern auch viele theologische Motive, die in der Heimat Newtons und auf dem Kontinent weit verbreitet waren. In Frankreich wirkte die Mechanik Newtons unter anderen gesellschaftlichen Bedingungen revolutionärer als in England. Hier folgte der geistigen Auseinandersetzung die politische Revolution. Schon im Verlaufe der Französischen Revolution erkannten die Anhänger Babeufs, daß die „bürgerliche Freiheit" die gesellschaftliche Ungleichheit erhält und verewigt. Die Anhänger Babeufs waren Vertreter neuer gesellschaftlicher Kräfte, die nach dem historischen Sieg der bürgerlichen Produktionsweise gegen diese auftreten müssen. Diese neuen Kräfte wuchsen vor allem nach der industriellen Revolution heran, die in England begonnen und dann alle fortgeschrittenen Staaten ergriffen hatte. Sie führte zur industriellen Großproduktion und zu den Klassenschlachten des Proletariats.

[3] F. Engels, Die Lage in England. Das 18. Jahrhundert, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 1, Berlin 1958, S. 559.

[4] K. Marx/F. Engels, Die heilige Familie, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 2, Berlin 1957, S. 133–134.

[5] F.-M. Voltaire, Elemente der Philosophie Newtons, in: Oeuvres, Bd. 31, Paris 1784.

Die Revolution in der Produktionsweise erklärt in letzter Konsequenz den neuen Stil, der der Physik des 19. Jahrhunderts eigen ist. Der Inhalt physikalischer Prinzipien hängt natürlich nicht von den historischen Bedingungen ab, aber Zeit, Ort und Formen der Entdeckungen dieser Prinzipien werden sehr wohl von ihnen beeinflußt. Es handelt sich hierbei gerade um jene Probleme, die zur Grundlage der Geschichte der Physik gehören und die diese Disziplin von der Physik trennen. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Umwälzungen im mechanischen Bereich der Industrie und die durch den Dampf hervorgerufenen Veränderungen voneinander abzugrenzen.

Die Mechanismen des 18. Jahrhunderts wie auch die mechanischen Antriebe des vorhergehenden Jahrhunderts verwandelten die Produktion insofern in angewandte Naturwissenschaft, als sie die Produktionstechnik in elementare Prozesse auflösten, die eine rationale kausale Analyse gestatteten. Damit wurden die Zunftgeheimnisse ebenso aus der Produktion verdrängt (bei weitem noch nicht vollständig), wie das System eindeutiger Gesetze der Mechanik die irrationalen Begriffe des Mittelalters aus der Wissenschaft eliminierte (wenn auch ebenfalls nicht vollständig). Aber mit der Anwendung des Dampfes wurden Kräfte ausgenutzt, die nicht durch eindeutig bestimmte dynamische Gesetzmäßigkeiten erfaßt werden konnten. Die Elastizität des Dampfes ist, wie es sich relativ schnell erwies, das makroskopische Resultat einer Vielzahl von Molekularbewegungen, die statistischen Gesetzmäßigkeiten unterworfen sind. Diese Erkenntnis war ein wichtiger Ausgangspunkt für neue physikalische Ideen. Auch in anderer Hinsicht schränkten die durch den Dampf verursachten Umwälzungen den Wirkungsbereich der bekannten physikalischen Gesetze ein. Vor allem sei hier auf den erweiterten Gegenstandsbereich der experimentellen Forschungen und auf die Verbesserung der physikalischen Experimentiertechnik verwiesen. In der Elektrizitätslehre und der Optik hatte es die Physik mit Prozessen zu tun, die mechanische Erklärungen lediglich in Form einer bedingten Analogie zuließen. Die in der Produktion durch die Dampfmaschine hervorgerufenen Veränderungen zwangen die Naturwissenschaft insgesamt, sich zumindest teilweise von der mechanischen Naturwissenschaft zu lösen. Es sei in diesem Zusammenhang nur auf die rationell betriebene Landwirtschaft hingewiesen, die den dem Darwinismus zugrunde liegenden Beobachtungen die Richtung gab. Darwins Entwicklungslehre war die für den Stil des wissenschaftlichen Denkens im 19. Jahrhundert wichtigste Entdeckung. Sie wies das Wirken statistischer Gesetzmäßigkeiten in der Natur nach.

Die sich auf dem Nährboden der industriellen Revolution herausbildende klassische Physik des 19. Jahrhunderts schuf die wissenschaftlichen Voraussetzungen einer neuen technischen Umwälzung durch die Elektrizität. Diese beschränkte sich nicht auf die industrielle Energetik, Transportwesen, Beleuchtung und Telegrafie. Die Spezialisierung der Werkzeugmaschinen, die Fließfertigung, die verschiedenen Formen der industriellen Automatik, neue technologische Methoden, die Ausbreitung elektrizitätsintensiver Prozesse, die Verwendung von Qualitätsstählen und speziellen Legierungen können als mittelbare Resultate der Elektrifizierung der Produktion angesehen werden. Die wichtigste Besonderheit lag in

der neuen Beziehung zwischen Energetik und Technologie. Grundsätzliche Veränderungen der Energetik in der Periode hydraulischer Antriebe und in der Periode des Dampfes haben ebenfalls Veränderungen im technologischen Bereich hervorgerufen. Aber die Energie des Wasserrades und der Dampfmaschinen konnte auf die alten Arbeitsmaschinen übertragen werden, weil die mechanische Transmission als Bindeglied zwischen Antrieb und Arbeitsmaschine erhalten blieb. Mit der Elektrifizierung änderte sich die Lage grundsätzlich. Von nun an wird die Energie den Verbrauchern auf nichtmechanische Art zugeleitet. Ihre Umwandlung in mechanische Arbeit ist an neue Maschinen gebunden, die eine unvergleichlich höhere Mechanisierung der Produktion ermöglichen. In anderen Fällen wird die Elektrizität nicht in mechanische Arbeit umgesetzt, sondern wirkt als unmittelbares technologisches Mittel (Elektrowärme, Elektrolyse). Die angedeutete umgestaltende Funktion der elektrischen Energie in der Produktion ist von großer Bedeutung. Die Verwendung von Elektrizität in der Produktion ist nicht nur dem Umfang der Produktion proportional, sondern auch der Geschwindigkeit des technischen Fortschritts. Diese Besonderheit der durch die Elektrizität hervorgerufenen Umwälzung findet keinen Vergleich in früheren technischen Umwälzungen. Die Zerlegung des technologischen Prozesses in elementare mechanische Operationen sprengte die technische Basis der Manufaktur und machte die Produktion beweglich, verwandelte sie in angewandte mechanische Naturwissenschaft. Die Dampfmaschine erhöhte das Tempo des technischen Fortschritts. Aber all das ist nicht mit der Elektrifizierung vergleichbar, bei der das Wachstum der energetischen Basis nicht von den qualitativen Veränderungen der Technik in allen Zweigen der Produktion zu trennen ist.

Der Dampf und die Elektrizität veränderten die Beziehungen zwischen Produktion und Wissenschaft. Die sich in der industriellen Revolution des 18. Jahrhunderts durchsetzenden Maschinen — mechanische Spinnmaschinen und Webstühle — erforderten vor allem die Anwendung der klassischen Mechanik. Die Berechnung der Arbeits- und Antriebsmaschinen führte zur Lösung einfacher mechanischer Aufgaben. Das Studium der Dampfmaschinen dagegen konnte sich nicht auf mechanische Probleme beschränken, es forderte physikalische Experimente. Der Dampf emanzipierte die Physik von der Mechanik und machte sie zu einer experimentellen Wissenschaft. Physikalische Experimente wurden bereits vorher durchgeführt, aber sporadisch und losgelöst von der Produktion. Im 19. Jahrhundert dienten die Experimente unmittelbar den Bedürfnissen der Produktion, in erster Linie im Bereich des Baues und der Anwendung von Dampfmaschinen und Ende des Jahrhunderts in wachsendem Maße in der Elektrotechnik. Natürlich wird das physikalische Experiment auch durch innere Gesetzmäßigkeiten bestimmt, durch die im eigenen Bereich oder in anderen Wissenschaftszweigen entwickelten experimentellen Forschungsmethoden.

Gerade das Experiment verlieh der Physik des 19. Jahrhunderts den antidogmatischen Charakter, der sie von der Wissenschaft des 18. Jahrhunderts unterschied. Das bedeutet jedoch nicht, daß die Wissenschaft im vorangegangenen Jahrhundert etwa dogmatisch war. Sie hatte sich gegen die Dogmatik der Peripatetiker gewandt. Aber im 19. Jahrhundert wurde die mechanische Beschränkt-

heit der Naturwissenschaft zum Dogma, das unter dem Druck neuer Fakten zu wanken begann. Die für die neue Periode spezifischen grundlegenden Entdeckungen stellten den Traditionen des 18. Jahrhunderts neue Konzeptionen und Methoden gegenüber. Das Experiment war die Grundlage für ihre Herausbildung und ihre Entwicklung.

Der mechanische Rationalismus des 17. Jahrhunderts hielt eine rein logische Ableitung ausnahmslos aller Gesetze der Natur aus einigen wenigen universalen Prinzipien für prinzipiell möglich. Wenn alle physikalischen Größen durch dieselben gesetzmäßigen Beziehungen miteinander verbunden sind, wenn diese Beziehungen auch bei unbegrenzter Vergrößerung oder Verkleinerung der physikalischen Größen gültig bleiben, kann man die Wissenschaft des ganzen Weltsystems einschließlich der kosmischen und mikrokosmischen Bereiche logisch aufbauen.

Diesen Weg beschritten Descartes und andere Wissenschaftler des 17. und 18. Jahrhunderts: Sie schufen ein kinetisches Weltbild, in dem die mechanischen Gesetzmäßigkeiten auch für den Mikrokosmos galten. Aber dieser Weg führte nicht zu eindeutigen Resultaten. Seine Logik basierte auf der Möglichkeit, Beziehungen, die in einer endlichen Zahl von Beobachtungen für endliche Bereiche gefunden wurden, als allgemeine Erkenntnis auf eine unendliche Zahl von Bereichen auszudehnen. Das gestattete, die empirisch gefundenen Gesetzmäßigkeiten beliebig zu verallgemeinern. Aber nur das Experiment kann die Grenzen bestimmen, innerhalb deren die Beziehungen und Gesetzmäßigkeiten ihren eindeutigen physikalischen Sinn und ihre objektive Bedeutung erhalten.

Eine solche Auffassung des Experiments widersprach den herrschenden Konzeptionen des 18. Jahrhunderts und wurde erst für das folgende Jahrhundert charakteristisch. Sie zeigt, daß die objektiven Gesetzmäßigkeiten der Welt nicht auf einfache Ausgangsschemata rückführbar sind. Die Gesetze der Mechanik wurden für einen bestimmten Kreis von Erscheinungen experimentell nachgewiesen. Descartes behauptete die universelle Gültigkeit dieser Gesetze. Ohne experimentelle Bestätigung übertrug er makroskopische Gesetze in jeden beliebigen Bereich. Newton begrenzte dagegen die Gültigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse auf den Kreis von Erscheinungen, der der experimentellen Überprüfung zugänglich war. Er sprach nur ungern über die Mikrowelt und den Äther. Die logische Verallgemeinerung experimentell nachgewiesener Gesetzmäßigkeiten mit ihrer experimentellen Überprüfung in neuen Bereichen, die auf experimentellen Daten begründete Modifikation, das Fortschreiten zu Komplizierterem, die Überprüfung allgemeiner Ausgangsvorstellungen sind Aufgaben des 19. Jahrhunderts.

Innerhalb der mechanischen Naturauffassung existieren somit unterschiedliche Beziehungen zum Experiment und zur Hypothese. Die cartesische Vorstellung über die Universalität mechanischer Gesetze schreibt kinetischen Hypothesen über den Kosmos und die Mikrowelt, die sich auf die Gesetze der Mechanik stützen, absolute Wahrheit zu. Bei Descartes ist von Hypothesen im heutigen Sinne nicht die Rede. Für ihn gibt es nur unanfechtbare Schlußfolgerungen aus allgemeinen Schemata. Nach der Newtonschen Auffassung von den Gesetzen der

Mechanik ist ihre Gültigkeit auf den Bereich von Erscheinungen beschränkt, für den sie aufgestellt wurden. Hypothesen werden von Newton abgelehnt, obwohl sie niemals völlig zu eliminieren sind und in versteckter Form auch in den „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" enthalten sind. Weder die cartesische noch die Newtonsche Physik kannte jedoch Hypothesen, die auf einer Modifikation mechanischer Gesetze beruhen, auf der Einführung von Begriffen, die nicht auf mechanische Gesetze reduzierbar sind, aber mit ihnen in Beziehung stehen. Die experimentelle Bestätigung solcher nichtmechanischer Hypothesen gehört zu den charakteristischen Zügen des 19. Jahrhunderts.

Diese Bestätigung stand mit den Problemen der Produktionstechnik in sehr engem Zusammenhang. Die experimentelle Bestätigung der Folgerungen, die sich aus dem Prinzip der Irreversibilität ergaben, war nicht von der Untersuchung des Kreisprozesses der Wärmekraftmaschinen zu trennen. Die experimentelle Untermauerung einer nichtmechanischen Auffassung des Feldes war eng mit Arbeiten an Transformatoren, Generatoren, Motoren und in der Folge an elektrischen Vibratoren und Resonatoren verbunden. Im Mittelalter sollten sporadische Experimente mystische „Sympathien" und „Antipathien" demonstrieren. Im 17. und 18. Jahrhundert wiesen die Experimente die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Prozesse nach. Aufgabe des Experimentators war es, die mechanischen Eigenschaften der Erscheinungen von den für die Naturwissenschaftler jener Zeit unwesentlichen nichtmechanischen Prozessen zu isolieren. Im 19. Jahrhundert ergaben Experimente, daß sich die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht auf die Mechanik zurückführen lassen. Eine gewisse Vorwegnahme einer solchen Theorie des Experiments finden wir bei den Enzyklopädisten. In ihrer Weltanschauung zeigten sich, ungeachtet ihres mechanischen Rationalismus, bereits innerhalb der Mechanik Tendenzen zu einer Physik, die nicht auf die Mechanik zurückzuführen war und die sich auf Experimente als Modifikation allgemeiner Schemata stützte.[6]

Man findet des öfteren solche Vorstellungen bei den Wissenschaftlern des 18. Jahrhunderts. Sie verändern jedoch nicht die grundsätzliche Charakteristik der Weltanschauung dieser Epoche. Sie zeigen nur, daß die herrschende Geistesrichtung nicht die einzige und ausschließliche sein muß. Im 19. Jahrhundert war eine solche Parteinahme für das Experiment nicht mehr erforderlich. Das Experiment war weitgehend zum eigentlichen Inhalt der Naturwissenschaft geworden.

Die für das 19. Jahrhundert charakteristischen physikalischen Experimente wurden durch die Entwicklung der Produktion historisch notwendig. Die Produktion bemächtigte sich solcher Naturerscheinungen, deren wissenschaftliche Durchdringung nur mit den Gesetzen der Mechanik ohne zusätzliche empirisch gefundene Begriffe nicht möglich war. Überzeugendes Beispiel hierfür ist die Irreversibilität thermischer Vorgänge, die Unmöglichkeit des Übergangs der Wärme von einem kalten zu einem warmen Körper. Die Irreversibilität, die beim Studium der Dampfmaschine nachgewiesen wurde, konnte nur statistisch mit den Gesetzen der Mechanik verknüpft werden.

[6] J. B. d'Alembert, Oeuvres, Bd. 1, Paris 1881, S. 336.

Im 18. Jahrhundert fanden sich jedoch auch Tendenzen innerhalb der Mechanik, die ihre Grenzen sprengten. Sie verallgemeinerten die mechanischen Begriffe derart, daß sie auf irreversible Prozesse ausgedehnt werden, in statistischen Konzeptionen ihren Platz finden konnten. Es geht hierbei nicht um eine Zusammenfassung statistischer und mechanischer Gesetzmäßigkeiten, sondern um eine Modifikation der mechanischen Gesetze, um die Veränderung und Ausweitung ihres Wesens. Diese Tendenz wird bei einer retrospektiven Analyse der Entwicklung der klassischen Mechanik augenscheinlich.

2. Die Gleichungen von Lagrange

Die mathematische Analyse mechanischer Probleme bedeutete mehr als nur eine Übersetzung der Gesetze der Bewegung der Körper und ihrer Wechselwirkungen in eine neue Sprache. Die Differentialgleichungen der Bewegung enthalten so wie die Differentialgleichungen des Feldes eigene physikalische Ideen, u. a. die vorerst noch unklare Vorstellung eines Kontinuums. Dieser Gedanke blieb aber in der Wissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts eine Ausnahme. Die Mechanik hatte es mit diskreten Körpern, ihren Koordinaten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu tun. Das Kontinuum spielte nur für einige Grenzbegriffe der Mechanik eine Rolle. Es bildete den Hintergrund, vor dem sich die diskreten Körper als Hauptaspekte der Mechanik abhoben. Nur auf dieser Grundlage konnte eine kinetische Lösung des Kräfteproblems gefunden werden. Viele Theoretiker des 17. und 18. Jahrhunderts wandten sich deshalb gerade diesem Bereiche zu. Sie machten sich über die Bedeutung der Grenzbegriffe Gedanken, mit denen sie in der Mechanik operierten. Der Stil dieser Untersuchungen unterschied sich von der in der Mechanik diskreter Körper üblichen Forschungsmethode. Die Lehre vom Kontinuum war bedeutend stärker naturphilosophisch orientiert.

Die Mechanik beantwortet die Frage, weshalb sich ein Körper zu einem gegebenen Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle des Raumes befindet. Man kann diesen Punkt bestimmen, wenn man die wirkenden Kräfte kennt, d. h., wenn man vom Kraftfeld ausgeht und die Bewegungsgleichungen anwendet.

Für die Mechanik existiert das Feld unabhängig vom gegebenen Körper. Daraus ergeben sich voneinander unabhängige Gleichungen der Bewegung und des Feldes. In dem einen Falle nimmt man das Feld als gegeben und unabhängig von der Bewegung des entsprechenden Körpers an, im anderen dagegen erscheinen die materiellen Körper, die Quellen des Feldes, als gegeben und unabhängig vom Feld.

In der Physik werden die Grenzbegriffe der Mechanik kausal erklärt. Der Begriff der Kraft (des Kraftfeldes) wird analysiert. Die Kräfte werden als Funktion der Koordinaten angenommen. Die spezifische Form dieser Funktion wird dann von der Gravitationstheorie, der Elastizitätstheorie, der Elektrodynamik oder den Grundgesetzen anderer physikalischer Bereiche bestimmt. Hierbei faßt man die Kräfte der Gravitation, der Elastizität, der Elektrizität und des Magnetismus anders auf als in der Mechanik. Die Kräfte sind nicht mehr nur Randerscheinungen. Es ist vielmehr Aufgabe der Physik, sie physikalisch oder formal von anderen Größen abzuleiten.

Die Grenze zwischen Mechanik und Physik trennt die Bewegungsgleichungen von denen des Feldes. Beide sind unabhängig voneinander, solange jegliche Wechselwirkung zwischen diskretem Teilchen und Feld ignoriert wird. Hat die Mechanik in ihren abstrakten Konstruktionen einen bestimmten materiellen Punkt hervorgehoben, so betrachtet sie ihn als rein passive Erscheinung. Zwar können Kräfte auf ihn einwirken, aber sie sind unabhängig von dem materiellen Punkt. Damit ist die Voraussetzung für die Lösung rein mechanischer Aufgaben gegeben. In der Feldtheorie betrachtet man dementsprechend das Kraftfeld als die passive Seite, als Funktion der vom Feld unabhängigen Teilchen, den Quellen des Feldes. Die Bestimmung der Bewegung durch die Kräfte und die Bestimmung der Kräfte als Funktion der Koordinaten bildeten für Newton in seinen „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“ zwei gesonderte Aufgaben. Bei der Lösung der ersten Aufgabe ging Newton von dem von ihm formulierten Axiom der Bewegung aus. Aber auch die zweite Aufgabe fand in den „Mathematischen Prinzipien“ ihre Lösung. Es wurde die Funktion bestimmt, die die Kräfte der Gravitation mit den Koordinaten verbindet. Das war sozusagen der Anfang der klassischen Physik. Nach dem Vorbild der Newtonschen Gravitationstheorie wurden später weitere Bereiche der Physik aufgebaut.

Jedes mechanische System wird in einem bestimmten Moment durch die Konfiguration der dem System zugehörigen materiellen Punkte charakterisiert. Eine solche Konfiguration betrachtete man als Punkt eines mehrdimensionalen Raumes. Lagrange gab in seiner „Analytischen Mechanik“[7] eine universelle Methode für die Erfassung des Zustandes eines Systems und seiner Bewegung in Koordinaten an, die Methode der verallgemeinerten Koordinaten. Er entwickelte die Funktion der Koordinaten und der Geschwindigkeiten, die bei der Bewegung des Systems invariant bleibt.

Es gibt wenig wissenschaftliche Entdeckungen, die man mit der Methode der verallgemeinerten Koordinaten hinsichtlich ihrer Wirkung auf Kraft und Stil des wissenschaftlichen Denkens vergleichen könnte. Die Lage eines materiellen Punktes im Raum — Ausgangspunkt der klassischen Mechanik — wurde mit der Konfiguration eines Systems verglichen, die als Punkt eines mehrdimensionalen „Raumes“ angesehen wurde. In der geometrischen Betrachtungsweise war das der zweite Schritt nach dem ebenfalls von Lagrange eingeführten Begriff einer vierdimensionalen Raum-Zeit. Der Begriff der vierten Dimension setzt sich in der Wissenschaft durch, nachdem Lagrange in seiner „Analytischen Mechanik“ die Grundlagen der klassischen Mechanik in Form einer vierdimensionalen analytischen Geometrie geschaffen hatte. Auch der n-dimensionale Raum wurde durch die „Analytische Mechanik“ in die Wissenschaft eingeführt. Die Lehre von mehrdimensionalen Räumen wurde von A. Cauchy, A. Cayley, J. Plücker, B. Riemann und vor allem von H. Grassmann in seiner Arbeit „Die Wissenschaft der extensiven Größen oder die Ausdehnungslehre“ auf rein formale Art weiterentwickelt.[8] Sie bereicherte die Mathematik durch neue Untersuchungsmethoden, trug zur Um-

[7] J. L. Lagrange, Analytische Mechanik, Berlin 1887.

[8] Vgl. H. G. Grassmann, Die Wissenschaft der extensiven Größen oder die Ausdehnungslehre, Leipzig 1844.

gestaltung der Grundlagen der Geometrie bei und bereitete die fruchtbare Interpretation der mehrdimensionalen Geometrie durch die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik vor.

Weitere mathematische Arbeiten initiierte die Vorstellung von Lagrange über den Zustand eines mechanischen Systems als Punkt im n-dimensionalen Raum. Allerdings kann man hierbei die physikalische Idee der formalen Ableitung nicht einfach gegenüberstellen. In der zweiten Hälfte des 18. und in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts waren formale mathematische Ableitungen wesentliche Voraussetzungen und teilweise sogar Formen der Emanzipation der Physik von der Mechanik.

Lagrange behandelte ein System von n materiellen Punkten. Die Lage dieser Punkte wird durch n Größen beschrieben, die jeweils drei Koordinaten: x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; ...; x_n, y_n, z_n enthalten. Wenn man jede Koordinate durch q mit den entsprechenden Indizes q_1, q_2, q_3 kennzeichnet, so kann die Konfiguration des Systems durch einen Punkt P mit $3n$ Koordinaten q_i dargestellt werden. Der Übergang eines Systems aus einer Lage in eine andere kann als Verschiebung des Punktes P oder durch einen $3n$-dimensionalen Vektor dq mit den Komponenten dq_1, dq_2, dq_3 ... dargestellt werden. Ist ein sich im dreidimensionalen Raum bewegendes System gegeben, so kann die Lageänderung als $3n$-dimensionale Bahn, als Resultierende der Verschiebung des Punktes P angesehen werden.

Die verallgemeinerten Koordinaten in der Mechanik Lagranges müssen nicht unbedingt cartesische Koordinaten der in das System eingehenden materiellen Punkte sein. Es kann sich um beliebige Parameter handeln, die die Konfiguration des Systems beschreiben. Für ein System, auf dessen Punkte die Schwerkraft oder Elastizitätskräfte einwirken, bestimmen die verallgemeinerten Koordinaten die in jedem Moment auf die Punkte wirkenden Kräfte und folglich auch ihre Beschleunigung. Die Geschwindigkeiten der Körper beeinflussen die Beschleunigung nicht und können bei gegebener Konfiguration des Systems unterschiedlich sein. Sind aber die Geschwindigkeiten unterschiedlich, so können bei gegebenen Beschleunigungen der Konfiguration auch die Kräfte im folgenden Moment unbestimmt sein. Um das künftige Verhalten des Systems in jedem Moment bestimmen zu können, müssen nicht nur die Koordinaten, sondern auch die Geschwindigkeiten gegeben sein. Erst diese Größen beschreiben den Zustand eines Systems hinreichend.

Der Begriff des Zustandes ist eng mit den grundlegenden Voraussetzungen der klassischen Physik verbunden. Wenn wir einzelne Körper und Bewegungen aus einer gegebenen ungeordneten Vielfalt abheben, so erscheinen bestimmte Prozesse als eine Folge von Zuständen der mit sich selbst identischen Körper, die ihre Lage im Raum ändern. Das ist auch die ursprüngliche Vorstellung der Mechanik. Die Veränderung der Koordinaten in Abhängigkeit von der Zeit gibt keinen Anlaß, an der Identität der beweglichen Objekte mit sich selbst zu zweifeln. Wir „erkennen" den Körper in jedem folgenden Moment wieder. Diese grundlegende Voraussetzung der Mechanik wird durch die *stetige* Veränderung der Koordinaten garantiert. Wir können behaupten, daß wir es mit ein und demselben Körper zu

tun haben, wenn es prinzipiell möglich ist, seine Existenz nachzuweisen und seine Geschwindigkeit in jedem Punkte des Intervalls zwischen zwei Lagepunkten zu bestimmen. Aus dieser Stetigkeit der Zustände ergeben sich die Differentialgleichungen der Bewegung, mit deren Hilfe wir alle folgenden Bewegungen des Körpers mit absoluter Sicherheit vorhersagen können, wenn wir die Anfangsbedingungen kennen. Lagrange wandte diese Beziehungen auf ein System von Körpern an und übersetzte somit die qualitativen Begriffe der Individualität und der mit sich selbst identischen mechanischen Systeme in die Sprache der Analysis. Die Differentialgleichungen der Bewegung, in die die verallgemeinerten Koordinaten q_i und die verallgemeinerten Geschwindigkeiten $\dot{q}_i = dq_i/dt$ eingehen, bringen somit die Idee des klassischen mechanischen Determinismus zum Ausdruck.

Als nächstes sei nach der Zahl der verallgemeinerten Koordinaten q_i (und der verallgemeinerten Geschwindigkeiten $\dot{q}_i$) gefragt, die für die Beschreibung eines Systemzustandes und folglich für die Vorhersage der folgenden Zustände notwendig ist.

Besteht das System nur aus einem Teilchen, so beschreiben die verallgemeinerten Koordinaten seine Lage im Raum, d. h., die Zahl f der verallgemeinerten Koordinaten q_i ist gleich drei. Existieren im System zwei Teilchen, so sind sechs verallgemeinerte Koordinaten erforderlich, drei gewöhnliche Koordinaten des ersten Teilchens und drei des zweiten. Wenn diese beiden Teilchen einen konstanten Abstand voneinander beibehalten (d. h. wenn es eine Bedingung für diese Verbindung gibt), genügen fünf verallgemeinerte Koordinaten. Allgemein ist die Zahl f gleich der Zahl der Freiheitsgrade des Systems. Jedes Teilchen besitzt im dreidimensionalen Raum drei Freiheitsgrade, n Teilchen somit $3n$ Freiheitsgrade minus k Bedingungen:

$$f = 3n - k.$$

Es existieren ebensoviel verallgemeinerte Geschwindigkeiten $\dot{q}_i$, die zusammen mit den Koordinaten nicht nur die Lage des Systems, sondern auch seinen Zustand bestimmen.

Mit Hilfe der verallgemeinerten Koordinaten kann man Bewegungsgleichungen für beliebige Bezugssysteme aufstellen. Lagrange führte hierzu die Funktion $L(q_i, \dot{q}_i, t)$ ein, die für konservative Systeme gleich der Differenz zwischen der kinetischen und der potentiellen Energie des Systems ist. Helmholtz bezeichnete diese Funktion später als kinetisches Potential.

Das kinetische Potential bzw. die Lagrange-Funktion L ermöglicht folgende Schreibweise der Bewegungsgleichung:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

Es existieren jeweils so viele Gleichungen, wie das entsprechende System Freiheitsgrade besitzt, d. h. $f = 3n - k$.

Nach den verallgemeinerten Koordinaten q_i und den verallgemeinerten Geschwindigkeiten $\dot{q}_i$ werden verallgemeinerte Impulse p_i eingeführt. Sie erscheinen als partielle Differentialquotienten der Funktion L nach den verallgemeinerten Geschwindigkeiten $\dot{q}_i$:

$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}, \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \quad \text{usw.}$$

Die Größe p_i wird als verallgemeinerter *Impuls* bezeichnet, weil sie bei cartesischen Koordinaten ($q_1 = x$, $q_2 = y$, $q_3 = z$) mit der Projektion des Impulses auf die entsprechende Koordinatenachse zusammenfällt. *Verallgemeinerter* Impuls wird die Größe deshalb genannt, weil z. B. bei Polarkoordinaten ($q_1 = r$, $q_2 = \varphi$) p_1 die Dimension einer Bewegungsgröße, p_2 die ihres Moments hat.

Mit Hilfe der verallgemeinerten Impulse kann man statt f Lagrange-Gleichungen (zweiter Ordnung) $2f$ Gleichungen erster Ordnung erhalten. Sie nehmen eine besonders einfache und symmetrische Form an, wenn man von der Lagrange-Funktion zur Hamiltonfunktion $H = T + U$ übergeht.

Gleichungen der Form von Lagrange und Hamilton werden in der Physik viel verwendet. Historisch gesehen erhielt die Physik durch sie das von der Mechanik zurück, was sie ihr zu früherer Zeit vermittelt hatte. Die verallgemeinerte Form der Bewegungsgleichungen, in der ein nichtmechanischer Parameter als Koordinate agieren konnte, ergab sich als Resultat der Entwicklung der Physik.

3. Das Prinzip der kleinsten Wirkung bei Maupertuis und Euler

Die Differentialform der Bewegungsgesetze weist auf die Stetigkeit der Bewegungen und auf die Identität der sich bewegenden materiellen Punkte oder Systeme materieller Punkte mit sich selbst hin. Die Art der funktionalen Abhängigkeit der Lage der materiellen Punkte von der Zeit, die Bahn der sich bewegenden Punkte wird durch das *Prinzip der kleinsten Wirkung* bestimmt.

Die Annahme einer bestimmten Größe, deren Minimum den realen Verlauf eines Prozesses charakterisiert, wurde erstmalig für die Reflexion des Lichtes aufgestellt. Heron von Alexandria sprach bereits davon, daß man das Reflexionsgesetz aus der Bedingung des kürzesten Weges gewinnen könne. Da sich die Lichtgeschwindigkeit bei der Reflexion nicht ändert, entspricht der kürzeste Weg auch der kürzesten Zeit. In inhomogenen Medien ist diese Bedingung allerdings nicht gegeben. Die Forderung nach kürzester Zeit trägt allgemeineren Charakter. Aus ihr ergeben sich die Brechungsgesetze. Fermat hat sie 1662 aus dem Prinzip der kürzesten Zeit abgeleitet, das die Bezeichnung Fermatsches Prinzip erhielt. Wenn sich die Lichtgeschwindigkeit auf ihrem Wege vom Punkt A zum Punkt B laufend verändert, so kann man das Fermatsche Prinzip als Forderung nach dem Minimum des Integrals des reziproken Wertes der Geschwindigkeit nach dem Weg ansehen.

In der Mechanik wurde ein Prinzip, das dem Fermatprinzip entspricht, erst im 18. Jahrhundert bekannt. Erstmalig formuliert wurde es jedoch fast gleichzeitig mit dem Prinzip von Fermat.

1669 schrieb Leibniz während einer Italienreise eine Abhandlung über grundlegende Probleme der Mechanik.[9] Diese Arbeit wurde allerdings erst zweihundert Jahre später veröffentlicht. In ihr wird der Begriff der Wirkung (actio formalis) als Produkt der Masse, der Geschwindigkeit und der Weglänge eingeführt. Die Weglänge ist gleich dem Produkt der Geschwindigkeit und der Zeit. Somit kann man die Wirkung auch als Produkt der Masse, des Quadrats der Geschwindigkeit und der Zeit definieren, d. h. als lebendige Kraft multipliziert mit der Zeit. In einem Brief (dessen Echtheit angezweifelt wird) äußerte Leibniz, daß bei einer Bewegung die Wirkung gewöhnlich eine maximale oder minimale Größe darstellt.[10]

Viele Jahre später, 1774, entwickelte Maupertuis die Vorstellung von der kleinsten Wirkung als einer universalen Gesetzmäßigkeit der Bewegung und des Gleichgewichts. Er behandelte die „Größe der Wirkung" und verstand darunter das Produkt der Masse, der Geschwindigkeit und des vom Gegenstand durchlaufenen Weges. Der Körper bewegt sich so, daß die Wirkung ein Minimum ergibt. Ein Gleichgewicht wird erreicht, wenn eine auf den Körper übertragene geringe Bewegung durch eine minimale Wirkung charakterisiert wird. Die Arbeit Maupertuis' rief eine der lebhaftesten Diskussionen des 18. Jahrhunderts hervor. Zu jener Zeit wurde die Annahme eines eindeutigen kausalen Zusammenhanges, die sich auf die Mechanik Newtons stützte, zum Mittel des geistigen Kampfes gegen das kirchliche Dogma. Und da entsteht innerhalb der Mechanik eine Konzeption, die die mechanischen Gesetzmäßigkeiten aus teleologischen Grundsätzen herleitete oder zumindest in eine teleologische Form kleidete. Maupertuis gab dem Prinzip der kleinsten Wirkung nicht nur einen teleologischen, sondern auch einen theologischen Anstrich. Er behauptete, daß die gesamte Natur durch das Prinzip der Zweckmäßigkeit der Schöpfung erklärbar ist. D'Alembert griff darauf Maupertuis in einigen Aufsätzen der „Enzyklopädie" an; Voltaire schrieb ein geistreiches und boshaftes Pamphlet gegen ihn. In den Streit waren noch weitere Wissenschaftler verwickelt. Diejenigen, die für die Enzyklopädisten Partei ergriffen, verlachten Maupertuis' teleologische Konzeption. Euler, der gewöhnlich nicht dazu neigte, religiöse Motive in die Erörterung wissenschaftlicher Probleme einzubeziehen, trat in diesem Falle als Verteidiger der Religion gegen die Freidenker auf und nahm auf seiten Maupertuis' an der Auseinandersetzung teil, allerdings mit einigen Vorbehalten. Der wahre Gehalt der Arbeiten Maupertuis' und die kurz darauf erschienenen weitreichenderen Untersuchungen Eulers, in denen das Prinzip der kleinsten Wirkung formuliert wurde, sprengten jedoch bald ihre anfänglich religiös-apologetische und teleologische Hülle.

Euler tat sehr viel, um das Prinzip der kleinsten Wirkung von seiner teleologischen Verbrämung zu befreien. Durch ihn erhielt das Prinzip seine mathematische Form. Diese Untersuchungen waren eng mit der Begründung der Variationsrechnung verknüpft.

[9] Vgl. G. W. Leibniz, Mathematische Schriften, Bd. 2, Halle 1860, S. 345–367.
[10] Vgl. G. W. Leibniz, Acta Eruditorum, Bd. II, 1751, S. 176.

1744 erschien Eulers bekanntes Buch „Methode, Kurven zu finden, denen eine Eigenschaft im höchsten oder geringsten Grade zukommt"[11]. Als Anlage fügte Euler eine kleine Arbeit über die Bestimmung der Wurfbewegung durch Methoden der Maxima und Minima bei.[12] In dieser Arbeit wird nachgewiesen, daß ein Körper, der sich unter der Einwirkung von Zentralkräften vom Punkt A zum Punkt B mit der Geschwindigkeit v bewegt, eine Bahn beschreibt, die einem minimalen oder maximalen Wert des Integrals

$$\int m\, v\, ds$$

entspricht. Euler löste eine Reihe von Aufgaben über die Wurfbewegung, die Bedingungen der Aufgaben dabei Schritt für Schritt erschwerend. Anfangs setzte er ein homogenes Gravitationsfeld voraus, später ein Feld, das eine Funktion der Höhe darstellte, des weiteren die Wirkung zweier im rechten Winkel auf den Körper wirkender Kräfte usw. Euler schlußfolgerte, daß das Prinzip der kleinsten Wirkung universelle Bedeutung für die Wurfbewegung hat, fehlenden Widerstand des Mediums vorausgesetzt.

4. Das Prinzip der kleinsten Wirkung in der analytischen Mechanik von Lagrange

In den Jahren 1760—1761 verallgemeinerte Lagrange die Resultate Eulers in zwei Artikeln über das Prinzip der kleinsten Wirkung. Abgesehen von einigen Äußerungen über die Möglichkeit, das Prinzip auf mehrere Punkte auszudehnen, war in den Arbeiten Eulers das Prinzip nur für einen materiellen Punkt formuliert. Lagrange verallgemeinerte das Prinzip auf ein beliebiges System von n Punkten mit den Massen m_i, die beliebig aufeinander einwirken und unter dem Einfluß von Zentralkräften stehen, die einer beliebigen Potenz der Entfernung proportional sind. In diesem Falle erfordert die Bewegung des Systems den kleinsten oder größten Wert der Summe

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \int v_i\, ds_i .$$

Als sehr fruchtbar erwies sich der von Lagrange eingeführte Begriff der isoenergetischen Variation. Lagrange verbindet hier das Prinzip der kleinsten Wirkung mit dem Erhaltungsprinzip der lebendigen Kraft. Er vergleicht Bahnen, die zwei Punkte A und B miteinander verbinden und die Forderung nach der Kon-

[11] Vgl. L. Euler, Methode, Curven zu finden, denen eine Eigenschaft im höchsten oder geringsten Grade zukommt, Leipzig 1894.

[12] L. Euler, Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti, Additamentum II, De Motu Proiectorum in medio non resistente, per Methodum maximorum ac minimorum determinando, in: Opera Omnia, Ser. 1, Vol. 24, S. 298–308.

stanz der Energie erfüllen, und schlußfolgert, daß von diesen Bahnen diejenige zutrifft, für die

$$S = \int_A^B m\,v\,ds$$

ein Minimum ist. Im allgemeinen werden die Wege zwischen A und B bei ein und derselben Gesamtenergie $E = T + U$ von den Teilchen in unterschiedlichen Zeitintervallen durchlaufen. Die potentielle Energie U ist in verschiedenen Punkten des Raumes unterschiedlich. Daraus folgt, daß sich bei konstanter Gesamtenergie E die kinetische Energie T und damit auch die Geschwindigkeit der Teilchen ändern muß. Wirkt auf den materiellen Punkt keine Kraft, so besteht die Aufgabe in der Bestimmung des Weges, auf dem sich das Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit von A nach B in kürzester Zeit bewegt. Hierfür ergibt sich eine gerade Linie.

Das Prinzip der kleinsten Wirkung in der Form Lagranges kann als Grundprinzip der Mechanik angesehen werden. Es läßt eindeutig erkennen, wie die Bewegung des Punktes oder des Systems bei gegebenen Anfangsbedingungen verlaufen wird.

Das Prinzip der Energieerhaltung gibt an, welche Bewegungen möglich sind. Es gibt für jede Bewegung des Körpers eine Gleichung. Aber sie bestimmt die wirkliche Bewegung des Körpers noch nicht eindeutig. Dafür sind so viele Gleichungen nötig, wie unabhängige Koordinaten die Bewegung bestimmen. Um die Bewegung eines freien Punktes zu erfassen, sind zum Beispiel drei Gleichungen erforderlich. Das Prinzip der kleinsten Wirkung ergibt die notwendige Zahl von Gleichungen. Aufgaben, in denen der Minimal- und Maximalwert bekannt ist, erbringen für jede unabhängige Koordinate eine besondere Gleichung.

5. Das Hamiltonprinzip und seine Entwicklung

In den dreißiger Jahren wendete Hamilton das Variationsprinzip systematisch auf Probleme der Dynamik an. Die erste Arbeit hierzu schrieb er 1833. Ihr folgten weitere Veröffentlichungen. Das in ihnen dargelegte Variationsprinzip unterscheidet sich vom Prinzip der kleinsten Wirkung. Nach dem Hamiltonprinzip bestimmt nicht das Integral der Bewegungsgröße nach dem Weg, sondern eine andere Größe mit ihrem minimalen (oder maximalen) Wert den Weg des Teilchens. Es ist das Integral der Lagrangefunktion nach der Zeit. Verglichen werden die verschiedenen Wege des Teilchens, die den Beziehungen entsprechen und zwei Raumpunkte miteinander verbinden, die Standorte des Teilchens, die in einer gegebenen Zeit zu durchlaufen sind: im Moment t_0 befindet sich das Teilchen im ersten Punkt, im Moment t_1 im zweiten. Das Integral der Lagrangefunktion

$$W = \int_{t_0}^{t_1} L\,dt$$

erhält für den tatsächlichen Weg seinen minimalen oder seinen maximalen Wert. Somit entfällt im Unterschied zum Prinzip der kleinsten Wirkung die Forderung nach der Konstanz der Energie entlang der zu vergleichenden Wege, und unter dem Integralzeichen steht eine andere Funktion. Die Größe W kann nicht nur ein Minimum, sondern auch ein Maximum darstellen, wogegen

$$S = \int_A^B mv\,ds$$

für den tatsächlichen Weg einen Minimalwert einnimmt.

Die Lagrangefunktion L ist für den Fall eines konservativen Systems gleich der Differenz der kinetischen und der potentiellen Energie $L = T - U$. In diesem Falle stimmt das Hamiltonprinzip mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung überein.

Die weitere Formalisierung des Prinzips der kleinsten Wirkung erfolgte durch Carl Gustav Jacobi in den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts. Bei Jacobi wird nicht das Integral nach der Zeit, sondern nach dem Weg gebildet. Für einzelne Teilchen ist der der kleinsten Wirkung entsprechende Weg eine bestimmte Linie im dreidimensionalen Raum. Für das System können wir uns die Bewegung als Bahn in einem mehrdimensionalen Raum vorstellen.

Nehmen wir ein Teilchen, das sich nach dem Trägheitsprinzip auf einer Oberfläche bewegt. Auf das Teilchen wirken im Gleichgewicht stehende zentrifugale und zentripetale Kräfte. Beide Kräfte haben keine tangentialen Komponenten. Somit wird sich das Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geodätischen Linie bewegen.

Es galt nun, diese Linie zu bestimmen. Hierbei wurde das Variationsprinzip noch stärker mathematisch formalisiert. Es erhielt eine geometrische Form, die sich als sehr fruchtbringend erweisen sollte.

Als sich die Mechanik physikalischen Gesetzmäßigkeiten weitgehend genähert, als sich ein Apparat entwickelt hatte, der nicht nur auf die Mechanik, sondern auch auf andere Bereiche anwendbar war, gehörten Vorstellungen über dynamische Gesetzmäßigkeiten, bei denen die anschauliche mechanische Interpretation verlorenging, zu ihrem wesentlichen Inhalt. Die Methode der verallgemeinerten Koordinaten und das Prinzip der kleinsten Wirkung verwandelten sich aus einem mechanischen, die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung im eigentlich mechanischen Sinne verallgemeinernden Prinzip in eine Methode und ein Prinzip der Physik. Als das mechanische Prinzip der kleinsten Wirkung in den Arbeiten von Hamilton seine allgemeine und mathematisch elegante Form erhalten hatte, wurde es gleichzeitig zu einem potentiell physikalischen Prinzip. Die Mathematik mit den ihr immanenten Triebkräften der Entwicklung, ihrem „freien Weg" nach dem Impuls, den sie durch die Bedürfnisse der Mechanik erhielt, lieferte der Wissenschaft einen Apparat, der bereits keine rein mechanische Deutung mehr zuließ, sondern eine physikalische Interpretation forderte. Hierin besteht vor allem die historische Bedeutung der Arbeiten von Hamilton und Jacobi über das Prinzip der kleinsten Wirkung.

Jacobi hat die Bedeutung des Prinzips der kleinsten Wirkung sehr klar formuliert. Sie besteht vor allem in der Verbindung des Prinzips mit den Differentialgleichungen von Lagrange: „... erstens in der Form, unter welcher es die Differentialgleichungen der Bewegung darstellt, und zweitens darin, daß es eine Funktion angibt, welche, wenn diese Differentialgleichungen erfüllt sind, ein Minimum wird.“[13]

Jacobi weist besonders darauf hin, daß bei einer solchen Behandlung des Prinzips kein Platz für metaphysische Ursachen bleibt.

Den nächsten entscheidenden Schritt in der Entwicklung des Prinzips der kleinsten Wirkung tat M. V. Ostrogradskij.[14] In einem Vortrag in der Petersburger Akademie entwickelte er 1848 das Prinzip der kleinsten Wirkung aus allgemeineren Bedingungen als Hamilton. Hamilton hatte angenommen, daß das System, das dem Prinzip der kleinsten Wirkung unterworfen ist, durch die Bedingung eingeschränkt ist, daß seine kinetische Energie eine homogene Funktion zweiter Ordnung der verallgemeinerten Geschwindigkeiten ist. Hieraus ergibt sich die Annahme einer stationären Verbindung. Ostrogradskij bearbeitete 1848 das Prinzip der kleinsten Wirkung ohne diese Bedingung.

Der Übergang von der speziell mechanischen Interpretation des Hamiltonprinzips zu einer allgemeineren Auffassung, die eine nichtklassische Konzeption vorbereitete, vollzog sich weitgehend spontan. Helmholtz, der das Prinzip der kleinsten Wirkung rein mechanisch auffaßte, wendete es 1886 systematisch auf die Probleme der Mechanik, der Thermodynamik und der Elektrodynamik an.[15] Er führte den Begriff des kinetischen Potentials ein, der eine verallgemeinerte physikalische Interpretation des Prinzips ermöglichte. Das kinetische Potential ist eine Größe, aus der man die Wirkung durch Integration nach der Zeit enthält. Diese Größe fand ohne mechanische Interpretation ihren Platz in verschiedenen Bereichen der Physik. In den Arbeiten von Helmholtz wurde das kinetische Potential nicht als abgeleitete Größe — als Differenz zwischen der kinetischen und potentiellen Energie —, sondern als Grundgröße behandelt. Hierin besteht ein wichtiger Schritt zur nichtmechanischen Auffassung des Prinzips der kleinsten Wirkung, da sich das kinetische Potential von dem mechanischen Ausdruck $L = T - U$ unterscheiden kann. Außerhalb der Mechanik, wo der Unterschied zwischen kinetischer und potentieller Energie seinen unmittelbaren Sinn verliert, kann man das kinetische Potential nicht eindeutig aus der gegebenen Energie bestimmen. Somit erlaubt die Eigenständigkeit des kinetischen Potentials, das Prinzip der kleinsten Wirkung zu einem universellen physikalischen Prinzip reversibler Prozesse zu machen, ohne daß ihre Gesetze auf solche der Mechanik zurückgeführt werden müssen.

Planck wies darauf hin, daß das Prinzip der kleinsten Wirkung den gleichen Weg durchlaufen hat wie das Energieerhaltungsprinzip. „Auch dieses galt anfangs

[13] C. G. Jacobi, Vorlesungen über Dynamik, Berlin 1866, S. 43.

[14] M. Ostrogradski, Mémoire sur les équations differentielles relatives au problème isopérimètres, in: Mém. l'Acad. Sc. St.-Petersburg 1850, S. 385–517.

[15] H. v. Helmholtz, Über die physikalische Bedeutung des Prinzips der kleinsten Wirkung, in: Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 3, Leipzig 1895.

allgemein als ein mechanisches Prinzip, ja seine Allgemeingültigkeit wurde eine zeitlang direkt als Beweis zugunsten der mechanischen Naturanschauung ins Feld geführt. Heute ist die mechanische Naturanschauung stark ins Wanken geraten, während an der Universalität des Prinzips der Energie niemand ernsthaft zu zweifeln Veranlassung hat. Wollte man heute das Wirkungsprinzip noch als ein speziell mechanisches Prinzip ansehen, so würde man sich einer ähnlichen Einseitigkeit schuldig machen."[16]

1829 erhob Gauß folgende Behauptung zum allgemeinen Grundgesetz: Ein System mit bestimmten Bindungen, das ohne Berücksichtigung der Reibung unter dem Einfluß beliebiger Kräfte steht, bewegt sich so, daß der Zwang durch die Bindungen und der Druck auf diese Bindungen einen Minimalwert ergeben. Gauß legt das Prinzip des kleinsten Zwanges folgendermaßen dar: „Die Bewegung eines Systems materieller, auf was immer für eine Art unter sich verknüpfter Punkte, deren Bewegungen zugleich an was immer für äußere Beschränkungen gebunden sind, geschieht in jedem Augenblick in möglich größter Übereinstimmung mit der freien Bewegung, oder unter möglich kleinstem Zwange, indem man als Maß des Zwanges, den das ganze System in jedem Zeitteilchen erleidet, die Summe der Produkte aus dem Quadrate der Ablenkung jedes Punktes von seiner freien Bewegung in seine Masse betrachtet."[17]

Die Idee von Gauß wurde durch das Prinzip des geradesten Weges weiterentwickelt, das Hertz in den Jahren 1892—1893 ableitete. Dieses Prinzip setzt gleichzeitig die Jacobischen Gedanken, die Geometrisierung des Variationsprinzips und der Mechanik insgesamt fort. Es ist in dem Versuch von Hertz enthalten, eine Mechanik ohne den Begriff der Kraft aufzubauen.[18]

Hertz untersuchte die Wege, die die geringsten Krümmungen aufweisen. Das sind die geradesten Wege. Somit verband er die Grundprinzipien der Mechanik mit geometrischen Begriffen, mit der Lehre von den Kurven. Hierzu mußten Vorstellungen über einen mehrdimensionalen Raum eingeführt und die Kurven eines solchen Raumes untersucht werden.

Nach den Worten von Hertz ist aus der geometrischen Vorstellung von einem System materieller Punkte und der Bewegung dieses Systems leicht zu ersehen, daß auch das Prinzip der kleinsten Wirkung ein geometrisches Prinzip ist. Hertz entwickelt diese Ideen weiter und kommt zu der Schlußfolgerung, daß der geradeste Weg mit der geodätischen Linie zusammenfällt.

Ende des 19. Jahrhunderts mehrten sich die Versuche, die Variationsprinzipien der Mechanik zu geometrisieren. In der Mechanik begannen Vorstellungen von einem dynamischen System als Punkt, der sich im vieldimensionalen Raum bewegt, eine ständig wachsende Rolle zu spielen. Die Kraftfelder ergaben sich hierbei als Krümmungen des mehrdimensionalen Raumes. Dadurch kann man das System als frei betrachten, die Kräfte durch Wechselbeziehung ersetzen und diese wieder-

[16] M. Planck, Das Prinzip der kleinsten Wirkung, in: Physikalische Abhandlungen und Vorträge, Bd. 3, Braunschweig 1958, S. 100.

[17] C. F. Gauß, Über ein neues allgemeines Grundgesetz der Mechanik, in: Journal für reine und angewandte Mathematik, Bd. 4, 1829, S. 232–235.

[18] Vgl. H. Hertz, Prinzipien der Mechanik, in: Gesammelte Werke, Bd. 3, Leipzig 1894.

um als Krümmungen des mehrdimensionalen Raumes ansehen. Der Übergang des Systems aus einem Zustand in einen anderen erweist sich somit als Bewegung eines Punktes entlang einer geodätischen Linie. Folglich verschwindet der Unterschied zwischen dem Trägheitsprinzip und dem Variationsprinzip für die Bewegung eines Systems in einem Kraftfeld. Richtiger wäre zu sagen, daß er sich in einen geometrischen Unterschied zwischen einem „ebenen“ und einem gekrümmten mehrdimensionalen Raum umwandelt.

V. DIE ERHALTUNG DER ENERGIE

1. Die Entwicklung der Begriffe lebendige Kraft, Arbeit und Energie in der Mechanik

Die Geschichte der Variationsprinzipien zeigte, wie die mathematische Verallgemeinerung von Begriffen der Mechanik eine neue physikalische Durchdringung dieser Begriffe vorbereitete. Die Theorie der Energieumwandlung wurde zum physikalischen Äquivalent des verallgemeinerten mathematischen Apparates, der durch Lagrange, Hamilton, Ostrogradskij, Jacobi, Helmholtz u. a. entwickelt worden war. Sie sprengte den Rahmen der Mechanik, weil sie auch nichtmechanische Formen erfaßte. Dieses Weltbild war vor allem von den Begründern der Thermodynamik, der statistischen Physik und der Elektrodynamik konzipiert worden.

Die Erhaltung der Energie wurde zum Grundgesetz der Physik. Man kann jedoch das Energieprinzip und dementsprechend die Energie auch rein mechanisch interpretieren. Diese Auffassung herrschte bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts vor. Erst später wurde die Energie eines mechanischen Systems zum Teilbereich eines allgemeineren Energiebegriffes, der qualitativ unterschiedliche Formen erfaßte, die sich nach bestimmten quantitativen Äquivalenten ineinander umwandeln können. Dieser Übergang der Energie von einer Form in eine andere wurde nun zur Grundlage der allgemeinen Definition. Für die Mechanik war die rein negative und quantitative Feststellung ausreichend, daß Energie nicht entstehen und nicht vergehen kann. Für die Physik ist die positive und qualitative Seite spezifisch: Eine bestimmte Form der Energie verschwindet, sie verwandelt sich nach einem bestimmten quantitativen Äquivalent in eine andere Form. Aus diesem Grunde ist es für die historische und logische Analyse des Übergangs von der Mechanik und der rein mechanisch aufgefaßten Physik des 18. Jahrhunderts zur teilweise emanzipierten Physik des 19. Jahrhunderts wichtig, die Entwicklung der qualitativen und positiven Vorstellungen über das Prinzip der Erhaltung der Energie zu verfolgen. Diese Vorstellung wurde von Engels klar umrissen[1] und war auch in einer Reihe rein physikalischer Arbeiten besonders der 80er Jahre zu erkennen. Sie bestimmte den historischen Wendepunkt zur eigentlich physikalischen Auffassung des Prinzips.

Engels legte diese positiven Seiten des Prinzips der Energieerhaltung in einer Analyse der Beziehung zwischen dem Energieprinzip und der Erhaltung des

[1] Vgl. F. Engels, Vorwort zur zweiten Auflage des Anti-Dühring, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, Berlin 1962, S. 13.

Impulses dar. Die Kollision zweier Maße der Bewegung mv und mv^2 und die entsprechende Beziehung zwischen der Erhaltung der Energie und des Impulses gehörten zu den grundlegenden Problemen der klassischen Physik und der Entwicklung einer verallgemeinerten Vorstellung von der Bewegung, die nicht auf eine einfache Verschiebung zurückzuführen ist.

Im 17. Jahrhundert entstand neben den rein kinetischen Prinzipien der Physik Descartes' und der dynamischen Richtung, die den Begriff der Kraft in den Mittelpunkt ihrer Mechanik stellte, eine dritte Richtung, die von Huygens und Leibniz repräsentiert wurde. Diese Richtung hatte schon damals die lebendige Kraft als realen Begriff in den Mittelpunkt der Mechanik gestellt, d. h. das Produkt der Masse mit dem Quadrat der Geschwindigkeit mv^2. Dieser Ausdruck, der bei Leibniz als Maß der Bewegung fungierte, wurde lebendige Kraft genannt. Er unterschied sich grundsätzlich von der Newtonschen Kraft und stimmte auch nicht mit dem Maß der Bewegung bei Descartes, dem Produkt von Masse und Geschwindigkeit (Impuls), überein. Die Newtonsche Kraft wird durch das Produkt der Masse mit der Beschleunigung bestimmt und ist natürlich nicht konstant. In seinen Kommentaren zum dritten Grundgesetz der Bewegung schrieb Newton auch über die actio agentis, das Produkt der Kraft mit der entsprechenden Komponente der Geschwindigkeit des Angriffspunktes der Kraft.[2] Aber Newton nahm kein System der Mechanik an, das auf der Erhaltung eines bestimmten Maßes der Bewegung beruhte, das bei einem elastischen Stoß oder einer ähnlichen mechanischen Erscheinung unveränderlich blieb. Newton schrieb im Gegenteil über eine Vernichtung von Bewegung beim unelastischen Stoß und bei der Reibung.

In der Mechanik des 17. und 18. Jahrhunderts ging die Idee der Erhaltung eines bestimmten Maßes der Bewegung von Galilei aus. In seinen Arbeiten ist bereits die Mehrzahl der grundlegenden Begriffe der klassischen Mechanik in einer sehr lebendigen, vielfach noch unbestimmten Form zu finden. Galilei verwies darauf, daß die Geschwindigkeit, wenn sie nicht eindeutig definiert wird, dazu benutzt werden könne, einen Körper auf ein Niveau zu heben, das höher als das ursprüngliche ist. Auf dieser Grundlage ergäbe sich die Möglichkeit eines perpetuum mobile.

Bei Huygens wurde die Unmöglichkeit, den Schwerpunkt eines Systems von Körpern höher als auf den Ausgangspunkt zu heben, zur Grundlage der Theorie des Pendels. Sie beruht somit auf der Unmöglichkeit, ein perpetuum mobile zu bauen.

Ende des 17. Jahrhunderts (1695) nannte Leibniz das Produkt mv^2 lebendige Kraft, vis viva (1829 teilte Coriolis diese Größe durch zwei). Der Begriff (aber nicht die Bezeichnung) der lebendigen Kraft ist noch früher in der Theorie des elastischen Stoßes zu finden. Hier war nicht nur von der Erhaltung der lebendigen Kraft bei einem elastischen Stoß (Wren, Huygens), sondern auch von einem Verlust bei einem unelastischen Stoß die Rede (Wallis).

Neben dem Begriff der lebendigen Kraft erschien in der Mechanik des 17. und 18. Jahrhunderts der Ausdruck Energie. Er findet sich als physikalischer Begriff

[2] Vgl. I. Newton, Mathematische Prinzipien der Naturlehre, Berlin 1872, S. 32ff.

schon bei Aristoteles. In neuerer Zeit wurde er von Galilei und später von Johann Bernoulli gebraucht.[3] Letzterer setzte die Energie mit der Arbeit gleich (allerdings nur in einem verlorengegangenen Brief an Varignon). J. Bernoulli, der wie Leibniz von der Erhaltung der lebendigen Kraft sprach, erörterte den Fall, daß mechanische Bewegung verschwindet, die Fähigkeit, Arbeit zu leisten (facultas agenti), aber erhalten bleibt. Er sprach davon, daß diese Fähigkeit in einer anderen Form erhalten bleibt, zum Beispiel in der Kompression. Aber J. Bernoulli hatte in den uns bekannten Arbeiten und, wie es scheint, auch in dem angeführten Brief an Varignon nicht an nichtmechanische, quantitative Begriffe gedacht, die es erlauben würden, die facultas agenti zu messen.

Euler betrachtet gleich J. Bernoulli die Erhaltung der lebendigen Kraft als ein universales Gesetz der Mechanik. Er zeigte, daß die lebendige Kraft materieller Punkte, die sich im Gravitationsfeld oder im Feld von Abstoßungskräften eines bestimmten unbewegten Zentrums befindet, ihren Anfangswert einnimmt, wenn der Punkt wieder zu seinem Ausgangsort zurückkehrt. Euler verwendete einen Begriff, der mit dem Begriff der Arbeit gleichzusetzen ist. Er schrieb über den Zuwachs der lebendigen Kraft, wobei unter lebendiger Kraft das Produkt der Kraft mit dem Weg verstanden wird, und nannte diesen Begriff effort. Daniel Bernoulli, der der lebendigen Kraft eine besondere Abhandlung gewidmet hat[4], verallgemeinerte das Erhaltungsgesetz, nachdem er eine Reihe von Aufgaben über die Bewegung materieller Punkte unter verschiedenen Bedingungen analysiert hatte. Schon vor dieser Arbeit verwendete D. Bernoulli in seiner „Hydromechanik“ (1738) das Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft in rein mechanischem Sinne.

Die „Hydromechanik“ D. Bernoullis enthält ein Kapitel, in dem die ungeordnete Bewegung der Gasmoleküle behandelt wird.[5] Dieser Abschnitt ist eines der frühesten Dokumente einer kinetischen Wärmetheorie. Somit sind das Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft und die kinetische Wärmetheorie in einem Werke anzutreffen. Aber eine Synthese dieser Ideen war sowohl dem 18. als auch der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts unbekannt. Die lebendige Kraft der Moleküle und die der makroskopischen Körper waren gewissermaßen zu nahe Verwandte, um eine fruchtbringende Verbindung einzugehen. Der rein mechanische Begriff der lebendigen Kraft sowohl makroskopischer Körper als auch mikroskopischer Teilchen wurde nicht unmittelbar zur Grundlage des Gesetzes der Erhaltung der Energie. Hierzu wäre es erforderlich gewesen, eine dynamische Veränderliche, die nur rein mechanische Größen aufweist, mit einer makroskopischen Veränderlichen (Wärme) zu vergleichen, die eine nichtmechanische Größe (Temperatur) enthält.

Seitens der Mechanik wurde ein solcher Vergleich mit der weiteren Entwicklung und Präzisierung des Begriffes Arbeit vorbereitet. Dieser Begriff wurde unter

[3] Vgl. M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Leipzig/Berlin 1913, S. 12.

[4] D. Bernoulli, Remarques sur le principe de la conservation des forces vives, pris dans un sens générale, in: Histoire de l'Academie de Berlin, 1748, S. 356.

[5] Vgl. D. Bernoulli, Hydrodynamik oder Kommentare über die Kräfte und Bewegungen der Flüssigkeiten, München 1965.

verschiedenen Bezeichnungen von allen bedeutenden Mechanikern des 17. und 18. Jahrhunderts seit Huygens und Leibniz verwendet. Die Bezeichnung „Arbeit“ (travail) wurde erst 1826 von Poncelet in seiner Arbeit über angewandte Mechanik eingeführt.[6]

Der Terminus „Energie“ als dynamische Variable mit den Dimensionen des Leibnizschen Maßes der Bewegung tauchte Anfang des 19. Jahrhunderts bei Thomas Young in seinen bekannten Vorlesungen zur Naturphilosophie auf (1807). Hier sind auch Ansätze einer kinetischen Wärmetheorie enthalten, ohne jedoch mit der im gleichen Buch entwickelten Idee der Erhaltung der lebendigen Kraft in Beziehung zu stehen. Diese Verbindung kam erst Mitte des 19. Jahrhunderts zustande, nachdem die kinetische Theorie eindeutige Formen angenommen hatte und das Energieprinzip auf nichtmechanische Prozesse, wie auf die Wärme, ausgedehnt worden war. Bei Young blieb die kinetische Wärmetheorie noch relativ unbestimmt. Seine Vorstellungen über das Erhaltungsprinzip beschränkten sich auf den Bereich der Mechanik. Bei einem zentralen Stoß bleibt die Bewegungsgröße zweier Körper erhalten, lautete die erste These Youngs.[7] Neben der Bewegungsgröße benutzte Young den Begriff der lebendigen Kraft. Er bezeichnete diese Größe als *Energie* des sich bewegenden Körpers und spricht davon, daß die Wirkung eines solchen Körpers auf ein von ihm zu überwindendes Hindernis (z. B. die Tiefe des Eindruckes, die von einer Kugel in weichem Lehm oder Stearin verursacht wird) proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit ist. Young war allerdings weit davon entfernt, nichtmechanische quantiative Begriffe und Größen einzuführen und sie auf die lebendige Kraft zu beziehen. Er sprach von der Erhaltung der Energie vollkommen elastischer Kugeln beim Stoß, wobei die mechanische Bewegung nicht in eine andere Form der Bewegung übergeht. Während der Periode von Leibniz bis d'Alembert, in der sich die Idee der lebendigen Kraft und ihrer Erhaltung herausbildete, verstummte nicht die Diskussion darüber, welche Größe — die lebendige Kraft mv^2 oder die Descartessche Größe mv — als Maß der Bewegung anzusehen sei. Bei d'Alembert finden sich einige Hinweise über die Anwendbarkeit beider Größen. Aber das Problem wurde nicht entschieden. Das Verhältnis zwischen der Erhaltung mv und der Erhaltung mv^2 war an Beziehungen zwischen den Eigenschaften des Raumes und der Zeit gebunden. Deshalb setzte die exakte Lösung des Problems historisch eine relativistische Verallgemeinerung der klassischen Physik voraus. Aber lange bevor sich Vorstellungen über den vierdimensionalen Energie-Impuls-Vektor entwickelten, lange vor der Klärung der Beziehungen zwischen den Erhaltungsgesetzen und der Veränderlichkeit von Raum und Zeit, wurden bereits Gedanken geäußert, die in gewissem Grade die heutige Interpretation vorwegnahmen. Hier, wie auch in einer Reihe anderer Fälle, ebneten die mathematischen und philosophischen Verallgemeinerungen der klassischen Physik den Weg für ihre relativistische Verallgemeinerung.

[6] Vgl. J.-V. Poncelet, Lehrbuch der Anwendung der Mechanik auf Maschinen, Darmstadt 1845/48.

[7] Th. Young, A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts, Bd. 1, London 1807, S. 75.

So nahm Engels die objektive Existenz von Bewegungsformen an, für die sowohl mv als auch mv^2 als Maße galten.[8] Der Begriff der Energie und sein Unterschied zum Begriff des Impulses ist bei Engels mit der Vorstellung von nichtmechanischen Bewegungen und wechselseitigen Übergängen verbunden, bei denen die Arbeit als Maß der Bewegung erhalten bleibt.

2. *Erhaltungsprinzip und Wärmelehre*

Im 18. Jahrhundert stützte sich die Vorstellung von der Erhaltung der Kraft gewöhnlich auf das Kausalitätsprinzip. Für viele Vertreter dieses Jahrhunderts war die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung eine Beziehung zweier mechanischer Prozesse. War einer dieser Prozesse nicht mechanisch, so suchte man unter dieser Erscheinung das eigentlich mechanische Wesen, die wegen ihrer Ausmaße unsichtbare Bewegung. Von diesem Standpunkt aus betrachtete die Mehrheit der Naturwissenschaftler des 17. und 18. Jahrhunderts die Wärmeerscheinungen. Die Idee der Umwandlung mechanischer Bewegung in Wärme und die kinetische Betrachtungsweise der Wärme wurden jedoch durch die Konzeption eines Wärmestoffes eingedämmt. Obwohl viele Vertreter der Naturwissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts gegen den Wärmestoff auftraten, besonders energisch Lomonossov, wurde dieser Begriff aus schwerwiegenden Gründen beibehalten.

Mit den allgemein bekannten Fakten der Erwärmung von Körpern durch Schlag und Reibung konfrontiert, plädierten die Physiker im 18. und am Anfang des 19. Jahrhunderts für den Begriff der Wärmekapazität. Sie nahmen an, daß sich durch Reibung zweier Holzstücke die Wärmekapazität ändert und dieselbe Wärmemenge eine höhere Temperatur ergibt. Damit erhielten Experimente eine entscheidende Bedeutung, die beweisen konnten, daß sich die Wärmekapazität bei der Reibung von Körpern nicht ändert. Solche Experimente führte Benjamin Thompson (Graf Rumford) 1798 durch. Er bestimmte die Wärmemenge, die beim Bohren von Kanonenrohren entstand. Nach der Theorie des Wärmestoffes kann die Erhöhung der Temperatur nur durch die Änderung der Wärmekapazität erklärt werden. Rumford wies nach, daß eine solche Veränderung nicht auftritt. Humphrey Davy, ein entschiedener Gegner der Wärmstoffhypothese, setzte Rumfords Versuche fort. Er schmolz zwei Stückchen Eis mittels Reibung, maß die Temperatur des entstehenden Wassers und verglich sie mit der Lufttemperatur. Weil beim Tauen die Wärmekapazität des Wassers wächst, kann die Erhöhung der Temperatur nicht auf eine Freisetzung des Wärmestoffes zurückgeführt werden. Somit ließen die Experimente auf eine andere Natur der Wärme schließen. Nach einer Reihe analoger Versuche hielt Davy den kinetischen Charakter der Wärme für ausreichend bewiesen. Einige Zeit später sprach sich Young in seiner Arbeit „Über die Theorie des Lichtes und der Farben" entschieden für eine Wellentheorie der Wärme und gegen den Wärmestoff aus.[9]

[8] F. Engels, Dialektik der Natur, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, a. a. O., S. 354 bis 383.

[9] Th. Young, On the theory of light and colours, Phil. Trans. 1802, Part I, S. 12.

In den bereits erwähnten „Vorlesungen zur Naturphilosophie" behauptete Young, daß sich die Wärme ihrer Natur nach nicht vom Licht unterscheidet, daß sie nur aus langsameren Schwingungen besteht als jene, die die Empfindung des Lichtes geben. Neben der Erforschung der Wärmekapazität und der Lehre elastischer Gase bereiteten die Entdeckungen von Louis-Joseph Gay-Lussac, Pierre Louis Dulong, Alexis Thérese Petit und anderer Wissenschaftler eine mechanische Konzeption der Wärme vor. Die Ausdehnung der Gase in Abhängigkeit von der Temperatur bedeutete Gewinnung mechanischer Arbeit auf Kosten der Wärme. Als man auch die Erhöhung der Temperatur bei der Kompression von Gasen entdeckt hatte, war die experimentelle Grundlage für die Annahme eines Überganges mechanischer Arbeit in Wärme und umgekehrt gegeben. Die Thermochemie wies ihrerseits eine Konstanz der Wärmemenge nach, die bei chemischen Prozessen unabhängig von den Zwischenstufen entsteht, über die der Prozeß verläuft. Diese Entdeckung widersprach ebenfalls der Annahme eines Wärmestoffes.

Die Entwicklung der Thermodynamik stand unmittelbar mit der Anwendung der Dampfmaschine im Zusammenhang. Im Jahre 1824 erschien eine der genialsten physikalischen Arbeiten aller Zeiten, Sadi Carnots „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen". „Jedermann weiß", leitete Carnot seine Betrachtungen ein, „daß die Wärme die Ursache der Bewegung sein kann, daß sie sogar eine bedeutende bewegende Kraft besitzt; die heute so verbreiteten Dampfmaschinen beweisen dies für jedermann sichtbar."[10] Die Theorie der Wärmekraftmaschinen blieb jedoch hinter der Praxis zurück. Die Verbesserungen der Dampfmaschinen waren in fast allen Fällen empirischer und zufälliger Art. So war auch folgendes Problem nicht gelöst: „Man hat oft die Frage erwogen, ob die bewegende Kraft der Wärme beschränkt ist, oder unendlich; ob die möglichen Verbesserungen eine angebbare Grenze haben, welche durch irgendwelche Mittel zu überschreiten durch die Natur der Sache unmöglich gemacht ist, oder ob im Gegenteil die Verbesserungen einer unbegrenzten Ausdehnung fähig sind."[11] Bei der Erörterung dieser Frage war es unbedingt nötig, von den konkreten Maschinen zu abstrahieren und das Problem der Umwandlung von Wärme in Bewegung in seiner allgemeinen Form zu lösen. Bei Behandlung der Entropie wird noch ausführlich über die Theorie Carnots zu sprechen sein. Hier sei nur auf das Wichtigste hingewiesen: Carnot erklärte das Entstehen mechanischer Arbeit nicht durch den Verbrauch an Wärme, sondern durch den Übergang der Wärme aus dem Kessel in den Kondensator. Die Wärme, von Carnot als besonderes Fluidum, als Wärmestoff angesehen, geht aus einem Reservoir mit hoher Temperatur in ein anderes mit geringerer Temperatur über. Wenn man den Begriff der Energie verwendet, der von Carnot allerdings noch nicht benutzt wird, kann man sagen: Die Energie des sich bewegenden Wärmestoffes geht in die Energie der Kolbenbewegung über. Ein Wärmemotor kann auch in umgekehrter Weise arbeiten und wird dann zur Kältemaschine. Er stellt dann

[10] S. Carnot, Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen, Leipzig 1892, S. 3.
[11] Ebenda, S. 6.

sozusagen eine Pumpe dar, die Wärme (Wärmestoff) aus dem weniger erwärmten Reservoir in das heißere hinüberpumpt, d. h. das Temperaturgefälle zwischen zwei Reservoirs vergrößert.

Carnots Konzeption war mechanisch, aber in einem anderen Sinne als die mechanische Wärmetheorie des 18. Jahrhunderts und die Theorie Robert Mayers. Der mechanische Charakter der Konzeption Carnots, ihre Vereinbarkeit mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie und der Unterschied zwischen den verschiedenen Inhalten des Begriffes „mechanisch" wird offensichtlich, wenn man die unterschiedlichen Antworten auf folgende Frage vergleicht: Auf wessen Kosten entsteht die mechanische Arbeit in einer Dampfmaschine? D. Bernoulli untersuchte die Bewegung des Kolbens in einem mit Gas gefüllten Zylinder und erklärte sie durch den äquivalenten Verlust an lebendiger Kraft der sich bewegenden Moleküle. Mayer und die phänomenologische Thermodynamik (erster Hauptsatz) verbanden das Entstehen mechanischer Arbeit mit dem Verschwinden einer äquivalenten *Wärmemenge*. Auch Carnot sah die *Arbeit* als Quelle der Bewegung der Wärmekraftmaschine an, hervorgebracht durch den Übergang des unveränderlichen Wärmestoffes. Die Arbeit wird auf Kosten eines äquivalenten Verbrauchs einer anderen Arbeit verrichtet: die Arbeit des sich bewegenden Kolbens auf Kosten des sich bewegenden Wärmestoffes. Die Umwandlung der Wärme in Arbeit, die Vernichtung von Wärme wird nicht angenommen. Die Wärmekraftmaschine arbeitet nach demselben Prinzip wie die hydraulische, das Wasser ist nur durch den Wärmestoff ersetzt, der Höhe der Wassersäule entspricht die Temperatur. Die Schwerkraft des Wassers multipliziert mit der Fallhöhe entspricht der lebendigen Kraft. Das Produkt der Wärmemenge (Wärmestoff) mit der Temperaturdifferenz entspricht der von der Dampfmaschine geleisteten Arbeit. Emile Klapeyron legte die Konzeption Carnots dar und errechnete das Äquivalent der geleisteten Arbeit durch das Produkt der Wärmemenge und der Temperatur (genauer: des Temperaturgefälles). Nach seiner Rechnung entspricht der Übergang von einer Kalorie über ein Temperaturgefälle von 1 Grad der Arbeit, die beim Heben eines Gewichtes von 1,41 kg um 1 m geleistet werden muß. Ein solches mechanisches Wärmeäquivalent entspricht dem Gesetz der Erhaltung der Energie, wenn unter der Energie das Produkt der Wärmemenge mit der Temperatur verstanden wird.[12]

Die Vorstellung, daß das Produkt aus Wärmemenge und Temperatur der Arbeit äquivalent ist, erlaubte es William Thomson, die Temperatur durch die Arbeit und die Wärmemenge zu definieren.[13] Die Temperatur (das Temperaturgefälle) wird durch die Arbeit bestimmt, die eine Kalorie bei diesem Gefälle verrichtet. So entstand der Begriff der absoluten Temperatur.

Carnots Konzeption ist insofern mechanisch, als sie die Arbeitsweise eines Wärmemotors der eines hydraulischen Motors oder allgemeiner einer Kraftmaschine gleichsetzt, bei der keine Bewegungsform in eine andere übergeht. Von den mechanischen Anschauungen des 17. und 18. Jahrhunderts unterscheidet

[12] Vgl. M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, a. a. O., S. 16.
[13] Vgl. Phil. Mag., Bd. 33, 1848, S. 313.

sich die Theorie Carnots außerdem dadurch, daß sie, analog zum Gravitationspotential der gewöhnlichen Materie, die Temperatur als Eigenschaft eines besonderen Fluidums ansieht.

Es sei darauf hingewiesen, daß sich Carnot in den dreißiger Jahren einer anderen Konzeption näherte, die sich im Prinzip nicht von der Mayers unterschied. In seinen „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers“ operierte Carnot zwar fortlaufend mit der Bewegung des Wärmestoffes, ließ aber an einigen Stellen bereits Ansätze einer neuen Wärmetheorie erkennen. Der Sinn solcher Bemerkungen wurde durch die postum veröffentlichten Auszüge aus Carnots Tagebuch deutlich. Hier äußert Carnot die Überzeugung, daß Wärme nichts anderes sei als bewegende Kraft oder Bewegung, die ihre Form geändert hat. Es handelt sich hierbei um die Bewegung kleinster Teilchen der Körper. Überall, wo bewegende Kraft vernichtet wird, entsteht gleichzeitig Wärme in genauen Äquivalenten zur verschwundenen bewegenden Kraft. Umgekehrt entsteht beim Verschwinden von Wärme eine bewegende Kraft. Somit kann man sagen: Die bewegende Kraft in der Natur ist konstant, sie wird weder erschaffen noch vernichtet, sie ändert ihre Form, aber verschwindet nicht.[14]

Carnot drang nicht nur bis zur Vorstellung eines Äquivalentes von Wärme und mechanischer Arbeit vor, sondern bestimmte auch das mechanische Äquivalent der Wärme, nicht des Produktes aus Wärme und Temperatur. Die Arbeit, die zum Heben von 1 m^3 Wasser um 1 m geleistet werden muß, ist nach Carnot 2,7 kcal. äquivalent. Daraus ergibt sich, daß 1 kcal 370 kpm entspricht.

3. Die Arbeiten Robert Mayers und ihre historische Bedeutung

Die mechanische Wärmetheorie und das Gesetz der Erhaltung der Energie wurden in den vierziger Jahren des 19. Jahrhunderts in einer Reihe von Arbeiten Robert Mayers begründet. Zu nennen sind vor allem seine Aufsätze „Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte“ (1841), „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ (1842), „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel“ (1845) und „Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme“ (1851).

Mayer gründete seine Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents auf Experimente, die Messungen der Temperatur, der Wärmekapazität und anderer physikalischer Größen enthalten. Er verwies aber in seinen Arbeiten nicht nur auf bestimmte Versuche und Messungen, die dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre zugrunde liegen. Mayer stützte sich auch auf allgemeine Prinzipien, auf die Verallgemeinerung vieler praktischer Beobachtungen, auf sonstige wissenschaftliche Experimente und Messungen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich Mayer von Joule und anderen Experimentatoren, die allerdings auch keine reinen Empiriker waren.

[14] Vgl. Brief M. H. Carnots vom 30. Nov. 1878 an den Präsidenten der Französischen Akademie der Wissenschaften, in: Comptes rendus, Bd. 87, 1878, S. 967.

Der schöpferische Weg Mayers zur Entdeckung des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre wurde allerdings nicht von der Logik der experimentellen Entdeckungen bestimmt. Die empirischen Daten, die Mayer zu seinen Überlegungen führten, waren zufällig, unsicher und reichten für eindeutige Schlußfolgerungen nicht aus. Man kann sie nicht mit den exakten klassischen Messungen physikalischer Größen im Bereich der Wärmelehre gleichsetzen, die sich im Zentrum des wissenschaftlichen Fortschritts befanden und historisch mit der Erforschung der Dampfmaschine verbunden waren. Auf diese Messungen stützte sich Mayer bei der Errechnung des mechanischen Wärmeäquivalents. Sie waren logisch wie historisch die Grundlage der Theorie. Biographisch und psychologisch aber ergaben sich andere empirische Ausgangspunkte. Mayer kam auf einer Reise als Schiffsarzt nach Ostasien erstmalig der Gedanke einer Äquivalenz von Arbeit und Wärme. Ein alter Steuermann erzählte ihm, daß sich das Meer während des Sturmes erwärme. In Batavia bemerkte Mayer bei der Untersuchung eines Matrosen, daß das venöse Blut in den Tropen heller ist als in unseren Breitengraden. Ein am Ort arbeitender Arzt bestätigte ihm diese Beobachtung als allgemein auftretend. Mayer schloß daraus, daß bei hohen Temperaturen die Oxydation, die die für den Körper notwendige Wärme liefert, geringer ist und damit auch weniger Kohlendioxyd im Blut entsteht. In diesem Moment — erzählte Mayer — sei ihm der Gedanke gekommen, daß Wärme und Arbeit ineinander umgewandelt werden können.

Wenn der Newtonsche Apfel nicht der Legende entstammt, so besteht hier eine gewisse Analogie. Zur Zeit Mayers gab es weniger empirische Beweise für die Umwandlung von Bewegung in Wärme als zur Zeit Newtons für die Gravitation. Aber sie waren immerhin ausreichend. Es fehlten aber die genauen quantitativen Beziehungen. Dessenungeachtet ging Mayer von zufälligen Fakten aus. Gerade sie waren zu jener Zeit kaum bekannt.[15]

Die Beobachtungen des Schiffsarztes Robert Mayer wirkten sozusagen als Katalysator, der die Synthese wärmetechnischer und thermodynamischer Daten mit den allgemeinen Ideen verband, ohne in das Resultat dieser Synthese, die klassische Thermodynamik, einzugehen.

Von welchen allgemeinen Voraussetzungen ging Mayer aus? Schon der erste Satz seines Artikels „Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte" gibt uns darüber Auskunft. Neben den experimentellen Daten liegt dem Gesetz der Energieumwandlung das Prinzip der Kausalität als Verallgemeinerung der gesamten naturwissenschaftlichen Erkenntnisse zugrunde.

„Die Aufgabe der Naturlehre ist es", schreibt Mayer, „die Erscheinungen in der leblosen sowohl als in der lebenden Welt nach ihren Ursachen und Wirkungen zu entwickeln. Alle Erscheinungen oder Vorgänge beruhen darauf, daß Stoffe, Körper, das Verhältnis, in welchem sie zueinander stehen, verändern. Nach dem Gesetz des logischen Grundes nehmen wir an, daß dies nicht ohne Ursache geschähe, und eine solche Ursache nennen wir Kraft."[16]

[15] Vgl. E. Meyerson, Du cheminement de la pensée, Bd. 1, Paris 1931, S. 229.
[16] R. Mayer, Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte, in: Kleinere Schriften und Briefe, Stuttgart 1893, S. 100–101.

Es folgt eine etwas unklare Formulierung des Begriffes der potentiellen Energie. „Alle Erscheinungen können wir von einer Urkraft ableiten, welche dahin wirkt, die bestehenden Differenzen aufzuheben, alles Seiende zu einer homogenen Masse in einem mathematischen Punkt zu vereinigen. Befinden sich zwei Körper in einer gegebenen Differenz, so könnten diese nach aufgehobener Differenz im Zustande der Ruhe verharren, wenn die Kräfte, welche ihnen behufs der Differenzausgleichung mitgeteilt wurden, zu sein aufhören könnten, werden dieselben aber als unzerstörlich angenommen, so werden die noch fortdauernden Kräfte, als Ursachen von Verhältnisveränderungen, die ursprünglich vorhandene Differenz wieder herstellen. Der Grundsatz also, daß einmal gegebene Kräfte, gleich den Stoffen, quantitativ unveränderlich sind, sichert uns begrifflich den Fortbestand der Differenzen und damit den der materiellen Welt."[17]

Unter „räumlicher Differenz" versteht Mayer die potentielle Energie einer Last, die auf eine bestimmte Höhe gehoben wurde. In einem Brief an Carl Baur vom September 1841 behandelt Mayer diesen Begriff so, daß keinerlei Zweifel an der Identität der „räumlichen Differenz" und der potentiellen Energie besteht. Die „räumliche Differenz" ist für Mayer die Ursache der Bewegung (der Beschleunigung).

„Setzen wir zwei Körper, im Universum isoliert, in eine gegebene Differenz zueinander, so werden sich beide in gerader Richtung zueinander bewegen; die letzte Ursache der Kräfte oder die Ursache, welche durch die Ausgleichung bestehender Differenzen sich kundgibt, erteilt beiden Körpern bewegende Kraft mit, als deren Folge oder Erscheinung wir die Bewegung auftreten sehen."[18]

In seinem ersten Artikel löst Mayer folgendes grundlegende Problem: Wo verbleibt die Energie eines sich bewegenden Körpers bei einem unelastischen Stoß? Bei einem elastischen Stoß wird die Energie weiterhin als Bewegung der beteiligten Körper erhalten. Je mehr sich die Elastizität verringert, um so mehr Bewegung verschwindet. Fehlt die Elastizität völlig, so wird die Bewegung vollständig aufgehoben. Diese verschwindende Bewegung bezeichnet Mayer als neutralisiert. Bei einem absolut unelastischen Stoß ist die neutralisierte Bewegung der ursprünglich vorhandenen völlig gleich. Mayer betrachtet auch den schiefen Stoß zweier unelastischer Körper und beweist, daß in diesem Falle ein Teil der Bewegung in Wärme übergeht.

Die Arbeit „Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte" wurde nicht in die von Poggendorff herausgegebenen „Annalen der Physik" aufgenommen. Sie wurde erst 36 Jahre später aufgefunden. Das zweite (das erste gedruckte) Dokument der Geschichte des Energieprinzips, der Artikel Mayers „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur", erschien 1842.

Dieser Artikel beginnt wie der erste mit einem Verweis auf das Kausalitätsprinzip. Daraus wird gefolgert, daß auch bei den Kräften Ursache und Wirkung einander quantitativ entsprechen müssen. Die Erhaltung der Kraft folgt unmittelbar aus der Unzerstörbarkeit der Ursachen. „In der Kette von Ursachen

[17] Ebenda, S. 101.
[18] Ebenda, S. 102.

und Wirkungen kann, wie aus der Natur einer Gleichung erhellt, nie ein Glied oder ein Teil eines Gliedes zu Null werden. Diese erste Eigenschaft aller Ursachen nennen wir ihre *Unzerstörlichkeit.*"[19]

Wenn eine Ursache eine ihr gleiche Wirkung hervorruft, hört sie selbst auf zu existieren. Sie verwandelt sich in ihre Wirkung. Deshalb ist den Ursachen neben der Unzerstörbarkeit auch die Fähigkeit eigen, verschiedene Formen anzunehmen. Diese klar bestimmte Beziehung zwischen *Erhaltung und Kausalität* macht die konkrete Form, in der Mayer den ersten Hauptsatz der Wärmelehre in den „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" darlegte, epistemologisch interessant. Aus der Unmöglichkeit einer Wirkung ohne Ursache und einer Ursache ohne Wirkung folgt die eindeutige Bestimmung der Wirkung. Der Begriff der Gleichheit, angewendet auf Ursache und Wirkung, stellt ein wichtiges logisch-erkenntnistheoretisches Problem dar, das in der philosophischen Literatur vielfach behandelt worden ist. Wenn Ursache und Wirkung absolut identisch sind, kann es keine Prozesse in der Natur geben. Alle materiellen Punkte im Raume wären miteinander identisch, und die Natur hätte nur eine Punktausdehnung. Sie würde außerdem nur einen Moment existieren, wenn alles auch in der Zeit identisch ist. Deshalb ist unter Kausalität der Zusammenhang zwischen nichtgleichzeitigen Ereignissen zu verstehen. Wodurch unterscheiden sich die zu verschiedener Zeit vor sich gehenden Ereignisse? Die Mechanik führt ihren Unterschied auf den Unterschied in der Konfiguration des Systems zurück, d. h. auf die Lage der materiellen Punkte in verschiedenen Zeitmomenten. Die mechanische Naturwissenschaft verneint die Veränderung eines unbeweglichen Körpers. Für die Mechanik führt jede Veränderung zu einem Prozeß, der durch die Formel $x = f(t)$ beschrieben wird, wo x den Abstand vom Bezugspunkt und t die Zeit darstellt. Ein unbeweglicher Körper weist keine veränderlichen Prädikate auf. In der statistischen Physik ändert sich die Sachlage. Auch in einem unbeweglichen Körper kann eine Zustandsänderung vor sich gehen. Die Veränderung wird nicht auf die Verschiebung einzelner Teilchen zurückgeführt. Das statistische Herangehen besteht gerade in der Ignorierung dieser Ortsveränderungen und ihrer nur makroskopischen Resultate.

Mit diesen Bemerkungen sind wir bereits vorausgeeilt, aber das war notwendig, um das Wesen des Begriffes Energie und seiner Erhaltung zu klären. Bei Mayer schließt die Veränderung der Energie (der Kraft) die Veränderung der Wärmemenge ein, die bei einer gegebenen Wärmekapazität durch die Temperatur des Körpers bestimmbar ist. Hierbei handelt es sich um eine nichtmechanische Veränderung in der Zeit, die nicht unmittelbar auf eine Veränderung der Koordinaten zurückführbar ist.

Mayer gab dem Begriff der Zeit einen unmittelbar physikalischen Sinn (so wie Carnot der Richtung der Zeit). Dieser Sinn besteht in der Veränderung des physikalischen Zustandes in ein und demselben Bereiche des Raumes. Mayer stellte dieser nichtmechanischen Veränderung die mechanische gegenüber, d. h. die

[19] R. Mayer, Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur, in: Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften, Stuttgart 1874, S. 3–4.

Lageänderung von sonst unveränderten Objekten im Raume. Welche Größe bleibt beim Übergang von einem dieser Prozesse zu einem anderen erhalten? Mayer bezeichnet sie als Kraft: Dementsprechend ist die Kraft eine Größe, die von der Ursache zur Wirkung übergeht, wenn Ursache und Wirkung verschiedener Natur sind. Der Impuls *mv* kann bei einem solchen Übergang kein Maß für die „Kraft" sein: Nur ein seine Lage ändernder Körper hat einen Impuls. Der allgemeinere Begriff der Bewegung, der auch die Veränderung eines sich nicht bewegenden Körpers einbezieht, muß durch eine andere Größe gemessen werden, durch die Kraft im Leibnizschen Sinne. In dieser Form erscheint der erst später klar herausgearbeitete Begriff bei Mayer. Die Kausalbeziehung vereinigt qualitativ unterschiedliche Prozesse. Daraus ergibt sich das Maß der invarianten Größe.

Mayer bezeichnet mit dem Begriff Kraft, was wir heute Energie nennen. Die Kraft im Newtonschen Sinne nennt er Eigenschaft.

Die Abgrenzung der Kraft (im Leibnizschen Sinne) und der Eigenschaft (Newtonschen Kraft) ist in Mayers Arbeit „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel" ausführlich dargelegt. Mayer stützt sich dabei auf die achte Erklärung in Newtons „Mathematischen Prinzipien". Dort wird die Bewegungsgröße einer Zentripetalkraft definiert. Am Schluß der Definition wird darauf verwiesen, daß die Ausdrücke „Anziehung" und „Impuls" gleichermaßen gebraucht werden können, weil die Art der Kraft nicht physikalisch, sondern mathematisch betrachtet wird. Nach Mayer ist die achte Erklärung Newtons so zu verstehen, daß die Gravitationskraft der Beschleunigung entspricht und als rein analytische Bestimmung der Bewegung im gegebenen Punkt aufzufassen ist. Sie ist dem Differentialquotienten nach der Zeit proportional. Anders ist es mit der physikalischen Ursache des Falls, die dem Produkt der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist. Teilen wir die letzte Größe durch zwei, so sehen wir deutlich, daß Mayers „physikalische" Kraft der Energie, die „mathematische" Kraft dagegen der Kraft im heutigen Sinne entspricht. Nach Mayer bestand der Grundfehler der Nachfolger Newtons darin, daß sie die „mathematische" und die „physikalische" Kraft, in der heutigen Terminologie Kraft und Energie, gleichsetzten.

In seiner Arbeit „Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme" (1851) geht Mayer nochmals auf die Begriffe Energie und Kraft ein. Hier bezeichnet er die „mathematische" Kraft, die durch die Beschleunigung des Körpers im gegebenen Punkt charakterisiert wird, als tote Kraft, die „physikalische" Kraft dagegen als lebendige Kraft. Nach Mayers Meinung kann man diese beiden Begriffe nicht in einer allgemeinen Bestimmung zusammenfassen. „Der bloße Druck (tote Kraft) und das Produkt des Druckes in den Wirkungsraum (lebendige Kraft) sind allzu ungleichartige Größen, um in einem Gattungsbegriff vereinigt werden zu können."[20]

Demnach blieb zu entscheiden, welcher der beiden Kategorien, der toten oder der lebendigen Kraft, die Bezeichnung Kraft abgesprochen werden sollte. Mayer wählte den ersteren Weg.

[20] R. Mayer, Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme, in: Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften, a. a. O., S. 268.

Die historische Bedeutung einer Behandlung der Newtonschen Kräfte als „Eigenschaften" wird aus der Gegenüberstellung der Mechanik, in der die Kräfte die grundlegenden und ursprünglichen Begriffe waren, und der Physik, in der das Kraftfeld durch neue Begriffe erfaßt wird, erkennbar. Diese Gegenüberstellung wurde jedoch dadurch erschwert, daß der neue skalare Begriff über zweihundert Jahre hinweg ebenfalls Kraft genannt wurde. So wurde die Leibnizsche lebendige Kraft vielfach mit der Newtonschen toten Kraft verwechselt. Mayer wollte weder dieselbe Bezeichnung für zwei physikalische Erscheinungen noch die Vorstellung eines übergeordneten Gattungsbegriffes für beide Begriffe gelten lassen. Er behielt die Bezeichnung Kraft für die Leibnizsche Kraft bei, da er sie für den fundamentaleren Begriff in der Physik hielt. Eine strenge Abgrenzung der Begriffe konnte erst später gegeben werden. In der weiteren Entwicklung der Physik haben sich die Bezeichnungen Mayers nicht durchgesetzt. Aber inhaltlich blieben seine Vorstellungen über den fundamentaleren Charakter des Begriffes Energie im Verhältnis zum Begriff Kraft gültig. Sie wurden systematisiert und gehören zu den Grundlagen der heutigen Physik.

In seinen „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" behandelte Mayer den Fall schwerer Körper und die Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie. Er entwickelte folgende Gedanken: Ursache für das Heben von Lasten ist eine Kraft. Daraus folgt, daß die gehobene Last ebenfalls eine Kraft besitzt. Somit ist die räumliche Differenz schwerer Körper als Kraft zu bezeichnen, weil diese Differenz die Ursache des Falls der Körper ist. Nichts anderes ist unter der „Kraft des Falls" zu verstehen. Die Kraft des Falls und die von ihr hervorgerufene Bewegung sind zwei Kräfte, von denen die erstere die Ursache und die zweite die Wirkung darstellt. Eine auf der Erde stehende Last kann nicht als Kraft wirken: Die Ursache der Bewegung ist nicht die Last selbst, sondern ihr Abstand von der Erde. Deshalb kann man die Schwere nicht als Ursache des Falls angeben und über eine bestimmte konstante Schwerkraft sprechen, die die Bewegung der Körper erklärt. Die Gravitation ist eine Eigenschaft, die weder unzerstörbar ist noch sich umwandeln kann. Zwischen der Eigenschaft und der Bewegung gibt es keine Äquivalenz. Wenn man trotzdem die Schwere als Ursache der Bewegung ansieht, so verletzt man das Prinzip der quantitativen Übereinstimmung von Ursache und Wirkung, weil die Gravitation Bewegung erzeugt, ohne sich zu verringern. Daraus folgt, daß die Ursache fallender Körper in der potentiellen Energie zu suchen ist oder, nach der Terminologie Mayers, in der räumlichen Differenz der wägbaren Körper.

Der Fall eines Körpers wird nach Mayer durch eine Kraft verursacht, die beim Fallen verschwindet und sich in kinetische Energie umwandelt. Beim Aufschlag verwandelt sich die Energie der sichtbaren Bewegung wiederum in eine andere Form. Reibung und Stoß rufen eine Erwärmung des Körpers hervor. Diese Erwärmung ist wiederum der kinetischen Energie äquivalent: „Zu nichts, wir wiederholen, kann die Bewegung nicht geworden sein und entgegengesetzte, oder positive und negative Bewegung können nicht $= 0$ gesetzt werden, so wenig

aus 0 entgegengesetzte Bewegungen entstehen können, oder eine Last sich von selbst hebt."[21]

Somit ist die Wärme eine Kraft, die der Bewegung der Körper und folglich auch der Fallkraft äquivalent ist. „Wie die Wärme als Wirkung entsteht, bei Volumsverminderung und aufhörender Bewegung, so verschwindet die Wärme als Ursache unter dem Auftreten ihrer Wirkungen, der Bewegung, Volumsvermehrung, Lastenerhebung."[22]

Ein Wasserrad verwandelt die Energie der gehobenen Last (des Wassers) in mechanische Bewegung und setzt diese zum Teil in die Wärme der Lager um. In der Dampfmaschine dagegen verwandelt sich die Wärme in Bewegung oder in das Heben von Lasten. Vergleichen wir die Theorie Mayers mit der von Carnot in seiner Arbeit „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen" entwickelten Theorie, so ergibt sich: Die tragende Idee Mayers ist die Erhaltung des Stoffes und der Energie. Die Theorie des Wärmestoffes ist in der Carnotschen Form mit der Erhaltung des Stoffes vereinbar. In dem von Carnot beschriebenen Zyklus verwandelt sich der Wärmestoff nicht in mechanische Arbeit, es verwandelt sich die Bewegung des unzerstörbaren Wärmestoffes. Schwieriger ist das Problem der Erhaltung der Energie: Der irreversible Übergang der Wärme schließt den Verlust der Arbeitsfähigkeit ein. Die Arbeit wird nicht aus Nichts geschaffen, kann sich aber in Nichts verwandeln, weil die Theorie des Wärmestoffes den Weg zur Vorstellung einer gleichmäßig verteilten Wärme als Äquivalent der Arbeit verschließt. Klapeyron läßt geradezu ein Verschwinden der Arbeit zu. William Thomson sah diesen anfechtbaren Punkt in den Konzeptionen von Carnot und Klapeyron und entwickelte eine neue Vorstellung.[23] Dieses Problem ist eng mit der Herausarbeitung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre und seiner Verbindung mit dem ersten Hauptsatz zu einer einheitlichen widerspruchsfreien Thermodynamik durch Clausius und Thomson verknüpft.

Die Theorie Mayers entsprach nicht nur vollständig dem Prinzip der Erhaltung des Stoffes, sondern auch der Erhaltung der Energie, weil es in ihr keine ungleichmäßige Verteilung der Wärme gibt und die Wärme, unabhängig von ihrer Verteilung, der Arbeit äquivalent ist. Somit scheidet die Wärme aus der Zahl der nichtvernichtbaren Stoffe aus und wird zur Form der unzerstörbaren Energie. Daraus folgt, daß der Begriff der Energie nicht nur Bewegung im herkömmlichen Sinne umfaßt (einschließlich der Bewegung des Stoffes vom Kessel in den Kondensator,) sondern auch die Wärme. Der Begriff sprengt somit den Rahmen der Mechanik.

Abschließend behandelte Mayer in seinen „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" das mechanische Äquivalent der Wärme. Nach Mayer exi-

[21] R. Mayer, Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur, a. a. O., S. 8.
[22] Ebenda, S. 10.
[23] W. Thomson, An account of Carnots theory of the motive of heat, with numerical results deducted from Regnaults experiments on steam, in: Trans. Roy. Soc. Edinburgh, Bd. 16, 1849, S. 541–574; vgl. auch: M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, a. a. O., S. 19.

stieren in der Welt drei Arten von Kräften: die Kraft des Falls, der Bewegung und der Wärme. Die beiden ersteren werden in denselben Einheiten gemessen. Die Wärme muß sich auch in diesen Einheiten ausdrücken lassen. Eine genaue Berechnung des mechanischen Wärmeäquivalentes wird in dieser Arbeit noch nicht angeführt, aber die allgemeine Idee einer solchen Bestimmung ist bereits gegeben. Mayer geht von der experimentellen Bestimmung der Wärmekapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen aus. Um die Temperatur eines Gases bei konstantem Druck um ein Grad zu erhöhen, muß man ihm eine bestimmte Wärmemenge zuführen. Dabei ändert sich das Volumen, und durch die Ausdehnung des Gases wird eine bestimmte Quantität mechanischer Arbeit geleistet. Um die Temperatur bei konstantem Volumen um ein Grad zu erhöhen, muß ebenfalls eine bestimmte, etwas niedrigere Wärmemenge zugeführt werden. Die Differenz zwischen diesen Wärmemengen ist der Arbeit äquivalent, die im ersteren Falle geleistet wurde. Diese Festlegung, die, wie sich später erwies, für ideale Gase zutrifft, lag der Berechnung des mechanischen Wärmeäquivalents durch Mayer zugrunde.

4. Thermodynamik und Mechanik

Wenden wir uns nun einer für die Geschichte der Physik sehr bedeutenden Besonderheit in den „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" und den folgenden Arbeiten Mayers zu. Der Entdecker des Prinzips der Energieumwandlung umging die Frage nach dem Wesen der Wärme und stellte darüber keinerlei Hypothesen auf. Noch wichtiger ist, daß seine Theorie auch keine kinetischen Hypothesen erforderte. Es zeigte sich erst später, daß die phänomenologische Thermodynamik gewisse Annahmen, die auf der kinetischen Gastheorie basieren, voraussetzen mußte, um eine eindeutige Beantwortung der Fragen zu erhalten. In den vierziger Jahren jedoch, als Mayer seine grundlegenden Ideen vorlegte, gab es nur eine Bedingung: die Annahme eines möglichen Übergangs von Wärme in Bewegung. Die fortschrittlichen Denker des 18. Jahrhunderts nahmen, den Traditionen Descartes' folgend, ein Weltall an, in dem nur Teilchen existierten, die in ihrer Bewegung den gleichen Gesetzen unterworfen waren wie die makroskopischen Körper. Demzufolge wurde in den kinetischen Theorien des 18. Jahrhunderts das Wesen der Wärme durch eine Molekularbewegung erklärt, die mit der makroskopischen Bewegung identisch war. Äquivalenz von Wärme und makroskopischer Arbeit bedeutete somit Identität von Ursache und Wirkung. Mayer brachte eine neue, für das 19. Jahrhundert typische Tendenz zum Ausdruck, die ihrem Wesen und ihrer historischen Rolle nach antimechanisch war. Ebendeshalb spielte Mayers Entdeckung eine so hervorragende Rolle in Engels' „Dialektik der Natur", die sich immer wieder gegen die Metaphysik und im besonderen gegen die metaphysische Verewigung der mechanischen Naturwissenschaft des 18. Jahrhunderts wendete.

Mayers phänomenologische Auffassung von der Wärme wurde später durch die kinetische Interpretation des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre gerechtfertigt.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die statistisch-kinetische Natur der Wärme enträtselt. Das bedeutete jedoch keine Rückkehr zu den kinetischen Ideen des 18. Jahrhunderts, weil in den neuen Anschauungen zuerst verschwommen (bei Clausius), dann aber sehr klar (bei Maxwell und Boltzmann) ein neuer Bewegungsbegriff auftauchte, der hinsichtlich der zugrunde liegenden Gesetze mit der makroskopischen Bewegung nicht identisch war. Mayers Position ebnete somit einer neuen Konzeption der Bewegung den Weg, die auch mit der mechanischen Bewegung nicht identische Formen enthielt. Hierbei spielte sowohl die innere Logik der physikalischen Theorie (die Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents setzte keine bestimmten Vorstellungen über die Natur der Wärme voraus) als auch die allgemeinen Anschauungen Mayers eine Rolle (quantitativ äquivalente Kräfte müssen nicht identisch sein).

In den Arbeiten Mayers fehlten somit nicht zufällig jegliche kinetische Vorstellungen über die Wärme. Dagegen konnte keine mechanische Theorie der Wärme ohne gewisse zeitlich bedingte Vorstellungen über den nichtmechanischen Charakter der Wärme entstehen. Die Begriffe „mechanisch" und „nichtmechanisch" fordern hierbei eine Erklärung. Wenn man über die mechanische Theorie der Wärme als historische Basis des Energieprinzips in den Arbeiten Mayers spricht, so bedeutet das Wort „mechanisch" etwas ganz anderes als in den kinetischen Theorien des 18. Jahrhunderts oder in der kinetischen Theorie Boltzmanns. In den Theorien des 18. Jahrhunderts wurde die Identität der mechanischen Gesetze des Makrokosmos und der Bewegungsgesetze unsichtbarer Teilchen postuliert. Ihre Gesetze wurden mit Hilfe derselben Veränderlichen formuliert. Die Gleichungen, die die makroskopischen Größen (die lebendige Kraft der mikroskopischen Körper, die beim unelastischen Stoß verlorengehen) und die mikroskopischen Größen (lebendige Kraft der Moleküle) verbinden, könnten einerseits eine makroskopische Größe enthalten, andererseits eine gigantische Menge (in der Größenordnung 10^{26}) von Größen, die mit Hilfe einer ebenso unermeßlichen Zahl von Gleichungen der Molekülbewegungen und der Anfangsbedingungen zu errechnen wären. Ein solcher nicht zu verwirklichender (und auch nicht nötiger) Apparat würde dem Begriff der mechanischen Theorie im Sinne des 18. Jahrhunderts entsprechen.

Bei Mayer setzt die mechanische Wärmetheorie die Existenz eines mechanischen Äquivalents voraus, das mit einer nichtmechanischen Veränderlichen verglichen wird, in deren Ausdruck nichtmechanische Größen enthalten sind (Temperatur). Die Entwicklung der Thermodynamik konnte nur in einer solchen phänomenologischen Form vor sich gehen. Erst danach konnte die phänomenologische Thermodynamik mit den kinetischen Vorstellungen über die Wärme vereinigt werden. Diese Aufgabe wurde von Clausius, W. Thomson, Maxwell und vor allem von Boltzmann gelöst. Für letzteren enthält die mechanische Wärmetheorie weder eine unmittelbare Identität der mechanischen Gesetzmäßigkeiten der Makro- und Mikrowelt noch eine phänomenologische Gegenüberstellung einer makroskopischen nichtmechanischen Größe (Wärmemenge) und einer makroskopischen dynamischen Veränderlichen (Arbeit). Boltzmann erkennt die statistische Verbindung zwischen mechanischen umkehrbaren Molekularbewegungen

und dem Verhalten des Ensembles, der statistischen Interpretation der nichtmechanischen Begriffe der Temperatur und der sie enthaltenden Ausdrücke.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre ist in der Arbeit Mayers aus dem Jahre 1842 vollständig enthalten. Mayer war allerdings weit von der strengen und abgerundeten mathematischen Form entfernt, die dieser Satz 1847 durch Helmholtz erhielt. Er kannte auch nicht den erst 1853 von Rankine eingeführten Begriff der Energie.[24] Dessenungeachtet begann die grundlegende Umwälzung in der wissenschaftlichen Weltanschauung mit den Arbeiten Mayers.

Diese Umwälzung erschütterte die mechanische Naturauffassung. In dieser hatte es eine Anzahl von Theorien gegeben, in denen die Annahme eines Wärmestoffes den allgemeinen Voraussetzungen einer mechanischen Naturauffassung schon nicht mehr widersprochen hatte. Die Theorie des Wärmestoffes barg allerdings irrationale Tendenzen in sich, weil sie es unmöglich machte, die Spezifik des Wärmestoffes auf mechanische (d. h. auf die zu jener Zeit einzig mögliche rationale) Weise zu erklären. Die Bewegungslehre jedoch war konsequent mechanisch in dieser Theorie enthalten. Der Wärmestoff bewegte sich genauso wie jeder beliebige andere Körper vom Kessel in den Kondensator, von einem Punkt des Raumes in einen anderen.

Die kinetischen Auffassungen der Wärme, die im 17. und 18. Jahrhundert den Theorien eines Wärmestoffes gegenüberstanden, stimmten dagegen völlig mit der mechanischen Auffassung überein.

Irrationale Momente wurden auch von der kinetischen Atomistik des 17. und 18. Jahrhunderts in die Lehre von den Stoffen getragen. Qualitative Unterschiede und Zustände makroskopischer Körper wurden durch die Bewegung unsichtbarer Teilchen erklärt. Dabei blieb der Unterschied zwischen dem qualitätslosen Stoff, aus dem die Teilchen bestehen sollten, und dem sie umgebenden Raum ungeklärt. Die Bewegung dieser Teilchen dagegen war völlig rational erfaßt: ein mit sich selbst identisches Teilchen verändert im Verlaufe der Zeit seine Koordinaten.

Anders verhielt es sich mit der Wärmetheorie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Einen Wärmestoff gibt es hier nicht mehr. Die Zustandsänderungen eines makroskopischen Körpers können auch nicht auf die Bewegung einzelner Teilchen zurückgeführt werden. Es ist nicht möglich, die Veränderung der mit sich selbst identischen Teilchen auf die Veränderungen der Koordinaten, d. h. auf ihre relative Lage im Raum bei unveränderlichen absoluten Eigenschaften zurückzuführen. In die Physik halten makroskopische Körper und Zustände Einzug, die nur statistisch auf mikroskopische Körper und Zustände zurückführbar sind.

Diese Auffassung wurde sehr schnell fruchtbar. Ohne Wärme, Elektrizität, Magnetismus und chemische Kräfte auf mechanische Bewegungen zurückzuführen, konnten Beziehungen zwischen allen Kräften der Natur hergestellt werden. Mayer begründet das Äquivalent von Wärme und mechanischer Arbeit vor allem mit prinzipiellen Argumenten. Prescott Joule dagegen schlug einen vorwiegend experimentellen Weg ein. 1843 veröffentlichte er die Resultate seiner Experi-

[24] W. J. M. Rankine, On the general law of the transformation of energy, Phil. Mag., 1853.

mente, die die Umwandlung mechanischer Kräfte in Wärme und ihr quantitatives Äquivalent nachwiesen.[25] Joule maß die Wärmemenge, die ein elektrischer Generator erzeugte. Es zeigte sich, daß die Wärme in einem konstanten Verhältnis zur verbrauchten mechanischen Arbeit stand. Joule führte auch die umgekehrte Umwandlung durch. „Aus diesen Versuchen mußte man notwendig schließen, daß Wärme und mechanische Kraft ineinander verwandelt werden könnten; und so wurde es offenbar, daß Wärme entweder die lebendige Kraft wägbarer Teilchen ist, oder ein Zustand der Anziehung oder Abstoßung, der im Stande ist, lebendig Kraft zu erzeugen."[26] Joule maß auch die Reibungswärme von Flüssigkeiten. Dabei zeigte sich, daß die sich entwickelnde Wärme nicht von der verwendeten Flüssigkeit abhängt (Joule verwendete Wasser, Öl und Quecksilber). In jedem Falle war die Wärmemenge, die die Temperatur von einem Pfund Wasser um ein Grad erhöhte, der mechanischen Kraft äquivalent, die eine Last von 772 Pfund beim Fall aus der Höhe von einem Fuß ausübte.

Joule untersuchte weiter, wie sich die Temperatur der Luft beim Zusammendrücken und Ausdehnen verändert. Seit langem war bekannt, daß sich die Luft beim Zusammendrücken erwärmt. Die alte Theorie erklärte dies durch die Verringerung der Wärmekapazität der Luft. Joule zeigte mit einigen einfachen Experimenten, daß eine solche Auffassung die quantitativen Beziehungen zwischen der Verringerung des Volumens beim Zusammenpressen der Luft und ihrer Temperatur nicht zu erklären vermag. Wenn sich die Temperatur wegen der Abnahme der Wärmekapazität verringern würde, so wäre anzunehmen, daß ein bestimmtes Volumen der Luft beim Zusammendrücken so viel Energie abgebe, wie bei seiner Ausdehnung auf das anfängliche Volumen wieder gebunden wird. In Wirklichkeit wird jedoch im umgekehrten Falle, wenn die Luft durch ein Ventil in die Atmosphäre dringt, bedeutend weniger Wärme gebunden. Wenn Gase nicht in die Atmosphäre, sondern in ein Vakuum ausströmen, wird überhaupt keine Abkühlung beobachtet. (Gay-Lussac hatte diesen Umstand bereits früher festgestellt.)

Die neue Theorie gab eine einfache Erklärung für dieses Verhalten. Die beim Zusammendrücken der Luft entstehende Wärme ist der mechanischen Kraft äquivalent, die beim Zusammendrücken aufgewendet wurde. Die Wärme, die bei der Ausdehnung der Luft gebunden wird, ist einer ganz anderen Größe, der mechanischen Arbeit, äquivalent, die für die Veränderung einer bestimmten Luftsäule der Atmosphäre notwendig ist. Als deshalb die Luft ins Vakuum strömte, hatte sie diese Arbeit nicht zu leisten.

Joule war vor allem Experimentator, aber durchaus kein Empiriker. Er entwickelte eine der ersten Hypothesen über die Molekularbewegung der Wärme. Anfangs nahm Joule an, daß die Atome von einer gewissen elektrischen Atmosphäre umgeben seien, die um die Atome kreist, wobei die Geschwindigkeit der

[25] J. P. Joule, Über die erwärmenden Wirkungen der Magneto-Elektrizität und über den mechanischen Wert der Wärme, in: Das mechanische Wärmeäquivalent, Gesammelte Abhandlungen, Braunschweig 1872.

[26] J. P. Joule, Einige Bemerkungen über die Wärme und die Konstitution der elastischen Flüssigkeiten, in: Ebenda, S. 121.

äußeren Schicht der Temperatur entspricht. Später ersetzte er diese Hypothese durch eine andere. In seiner 1851 veröffentlichten Arbeit[27] charakterisierte Joule die Wärmebewegung der Teilchen als geradlinige Bewegung in alle Richtungen, wobei die Temperatur der lebendigen Kraft dieser Molekularbewegungen entspricht. Dieses physikalische Bild wandte Joule auch auf Gase an. Er entwickelte somit eine kinetische Gastheorie.

Emile Meyerson zeigt sehr überzeugend, daß Joule von einer bereits vorher gefestigten Überzeugung von der Erhaltung der Bewegung ausging. „Nachdem er jedoch die Versuche angestellt hatte, und nachdem sich ... herausgestellt hatte, daß ihre Ergebnisse sehr stark divergierten, schloß Joule nun nicht etwa, daß das betreffende Verhältnis nicht konstant, sondern variabel sei, vielmehr nahm er das Mittel aus allen seinen Versuchsergebnissen und erklärte dieses für den wirklichen Wert des besagten Verhältnisses; er war also offenbar von vornherein von seiner Konstanz überzeugt."[28]

Diese vorweggenommene Überzeugung ergab sich bei Joule wie auch bei Mayer aus dem Prinzip der Kausalität. Joule hält es jedoch für nötig, diese Idee in eine theoretische Form zu kleiden: „Wir könnten a priori deduzieren, daß eine solche absolute Vernichtung der lebendigen Kraft $^1/_2\, mv^2$ nicht stattfinden kann, denn es ist offenbar absurd anzunehmen, daß die Kräfte (powers), mit denen Gott die Materie ausgestattet hat, durch die Tätigkeit des Menschen zerstört oder geschaffen werden könnten; aber wir sind nicht auf dieses Argument allein angewiesen, wie entscheidend es auch jedem vorurteilsfreien Geiste erscheinen muß."[29]

Die Arbeiten des dänischen Ingenieurs August Colding, der sich mit Mayer und Joule die Ehre der Entwicklung einer mechanischen Wärmetheorie teilte, enthalten sowohl naturphilosophische Überlegungen zur Erhaltung der Bewegung als auch Ergebnisse von Experimentaluntersuchungen. Die philosophische Begründung der Unzerstörbarkeit der Kräfte trägt bei ihm scholastische Züge: „Da die Kräfte geistige, stofflose Wesen sind, Entitäten, die wir nur durch ihre Herrschaft über die Natur kennen, so müssen sie zweifellos jeden existierenden materiellen Dingen weit überlegen sein; und da es evident ist, daß die Weisheit, die wir in der Natur bemerken und bewundern, sich nur in den Kräften ausdrückt, so müssen diese Kräfte zu der geistigen, stofflosen und intellektuellen Macht in Beziehung stehen, welche den Fortschritt in der Natur leitet. Wenn dem aber so ist, so ist es ganz unmöglich, diese Kräfte als etwas Sterbliches oder Vergängliches zu begreifen. Folglich sind sie ohne allen Zweifel als unvergänglich anzusehen."[30] „So meint also Colding", kommentiert Meyerson dieses Zitat, „daß es genüge, die große Bedeutung des Kraftbegriffes hervorzuheben, den Rang dieses Begriffes sozusagen in den Himmel zu heben, um daraus zu deduzieren, daß die Kraft eine *Substanz* sei, daß sie sich erhalten müsse."[31]

[27] Ebenda.
[28] E. Meyerson, Identität und Wirklichkeit, Leipzig 1930, S. 207–208.
[29] Zit. nach: E. Meyerson, Identität und Wirklichkeit, a. a. O., S. 208.
[30] Zit. nach: E. Meyerson, Identität und Wirklichkeit, a. a. O., S. 207.
[31] Ebenda, S. 207.

Von diesen Voraussetzungen ausgehend, nahm Colding an, daß man das Prinzip der Erhaltung mechanischer Kräfte auf alle chemischen und physikalischen Prozesse erweitern müsse. Er wollte seine Überlegungen nur in der Form philosophischer Verallgemeinerungen veröffentlichen. Dem Rat Oersteds nachkommend, gab er ihnen aber noch eine experimentelle Begründung bei. In dem von ihm gebauten Gerät bewegten sich Körper mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf metallischen, hölzernen und anderen Oberflächen. Die Wärme, die durch die Reibung entstand, wurde gemessen. Colding führte etwa 200 Versuche durch und erzielte weitgehend übereinstimmende Resultate.

Die Entdeckungen der vierziger Jahre wurden durch Hermann von Helmholtz in seinem Vortrag „Über die Erhaltung der Kraft", gehalten am 23. Juli 1847 in der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin, gewissermaßen abschließend zusammengefaßt.[32]

Helmholtz ging vom Kausalitätsprinzip aus: Prozesse, die in der Natur vor sich gehen, müssen eine Ursache haben. Diese kann veränderlich sein, wie die Zentralkraft einer Anziehung oder Abstoßung. Sie ist nicht von anderen Ursachen abhängig und bildet einen Endpunkt in der wissenschaftlichen Erklärung der Natur. Wenn die direkten Ursachen einer Erscheinung veränderlich sind, keinem unveränderlichen Gesetz unterliegen, so muß die Untersuchung weitergeführt werden, bis man zur letzten unveränderlichen Ursache vorgedrungen ist. Die Wissenschaft hat nach Helmholtz die Aufgabe, die Erscheinungen durch die mechanische Kausalität auf der Grundlage von Zentralkräften zu erklären. Letztlich können sich die Elemente der Welt nur bewegen, d. h. den Abstand zueinander verändern, sich voneinander entfernen oder sich nähern, sich gegenseitig anziehen oder abstoßen. „Es bestimmt sich also endlich die Aufgabe der physikalischen Naturwissenschaften darin, die Naturerscheinungen zurückzuführen auf unveränderliche, anziehende und abstoßende Kräfte, deren Intensität von der Entfernung abhängt."[33]

Es war seit langem bekannt, daß in einer Welt, in der materielle Punkte durch Zentralkräfte miteinander verbunden sind, die alle Bewegungen der Punkte erklären, die lebendige Kraft dieser Punkte konstant ist. Helmholtz bewies die umgekehrte These: Aus der Erhaltung aller Kräfte kann der zentrale Charakter der Elementarkräfte abgeleitet werden, die zwischen den materiellen Punkten wirken. Die Erhaltung der lebendigen Kraft kann dabei als Unmöglichkeit eines perpetuum mobile dargestellt werden. Helmholtz betrachtet ein System sich wechselseitig beeinflussender Körper. Sie bewegen sich unter dem Einfluß von Kräften und erreichen eine bestimmte Geschwindigkeit. Diese Bewegungen können wiederum die Arbeit leisten, die verbraucht wurde, um die Körper in Bewegung zu setzen und die entsprechenden Geschwindigkeiten zu erreichen.

Die Arbeit, die das System in eine bestimmte Lage versetzt, ist gleich der Arbeit, die notwendig ist, um das System wiederum in den Anfangszustand zurückzuführen. Das bedeutet, daß die lebendige Kraft L gleich der von den wirkenden Kräften verrichteten Arbeit A (durch die das System bestimmte

[32] Vgl. H. v. Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, Leipzig 1915.
[33] Ebenda, S. 6.

Geschwindigkeiten und die entsprechende lebendige Kraft erreichte) plus einer bestimmten konstanten Menge an Arbeit ist:

$$L = A + \text{const.}$$

Helmholtz führt für die Arbeit A eine neue quantitative Größe, die Spannkraft U ein, deren absoluter Wert der Arbeit A gleich ist, die aber das umgekehrte Vorzeichen aufweist. Es ergibt sich somit

$$L + U = \text{const.}$$

Diese konstante Summe nennt Helmholtz Kraft, natürlich nicht im Newtonschen, sondern im verallgemeinerten Leibnizschen Sinne. Somit erhält das Gesetz der Erhaltung lebendiger Kräfte die Form eines verallgemeinerten Erhaltungssatzes, der auch auf nichtmechanische Erscheinungen angewendet werden kann. Für Helmholtz bleibt es allerdings ein mechanisches Gesetz. Hierin ging Mayer weiter als Helmholtz. Aber die klare und strenge Form, die Helmholtz dem Energieprinzip gab, ermöglichte und stimulierte das Übergreifen des Prinzips auf nichtmechanische Prozesse. Sie gab deshalb auch den entscheidenden Anstoß zu seiner weiteren Entwicklung und seiner Umwandlung in ein universales physikalisches Prinzip. Das Wort „universal“ bedeutet hier nicht allgemeine Anwendbarkeit des mechanischen Prinzips auf alle physikalischen Prozesse, sondern es unterstreicht im Gegenteil den nichtmechanischen Charakter dieses Prinzips.

Helmholtz’ Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft“ ist deshalb von besonderem Interesse, weil sie die Bemühungen, die Gesetzmäßigkeiten der Physik auf den mechanischen Erhaltungssatz zurückzuführen, mit der inneren Logik verbindet, die zur nichtmechanischen Verallgemeinerung des Prinzips führt. Helmholtz ging von anderen Vorstellungen über die Gleichheit äquivalenter Kräfte aus als Mayer. Er war von der Identität der ihnen zugrunde liegenden Gesetze überzeugt und glaubte, daß der Übergang vom Prinzip der lebendigen Kräfte zur Erhaltung der Summe $L + U = \text{const.}$ der Übergang zu einer anderen Form des Gesetzes der Mechanik sei. Aber auch die Mechanik fordert für einen solchen Übergang eine neue Betrachtungsweise ihrer Grenzbegriffe. Helmholtz spricht über die Energie eines schweren Körpers. Aus den von Galilei und Huygens aufgestellten Pendelgesetzen folgt, daß eine schwere Kugel, an einen Faden aufgehängt, sich wieder auf die Höhe erhebt, von der sie ihre Bewegung zum niedrigsten Punkt angetreten hat (wenn die Reibung und der Widerstand der Luft vernachlässigt werden). Hierbei hängt die Geschwindigkeit im niedrigsten Punkt nicht vom durchlaufenen Weg ab. Wenn das Pendel durch eine schwere Kugel ersetzt wird, welche sich in einer Rinne bewegt, die sich erst senkt, dann aber erhebt, so bleibt das Pendelgesetz in Kraft. Die Kugel steigt unabhängig von der Form der Rinne so weit, wie sie vorher herabgerollt ist. Schon daraus kann man schlußfolgern, daß sich eine bestimmte Größe im Verlaufe der Bewegung des Pendels oder der Kugel nicht verändert. Diese Größe ist gleich dem halben Produkt aus Gewicht und Abstand zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Punkt der Bewegung.

Bezeichnet man diese Größe mit E, den Abstand mit x, die Geschwindigkeit mit v, die Masse mit m, das Gewicht mit mg, so erhalten wir folgende Gleichung:

$$E = \frac{m}{2} v^2 + mgx.$$

Von den zwei Summanden der Komponente E kann sich jeweils nur einer auf Kosten des anderen vergrößern. Diese Behauptung unterscheidet sich nur in der Bezeichnung von der heutigen Formulierung des Erhaltungsgesetzes der Energie. Der erste Summand stellt die kinetische Energie dar, der zweite die potentielle Energie. Die Summe E der kinetischen und der potentiellen Energie ist konstant, sie drückt die mechanische Gesamtenergie des Körpers aus. Wenn in einem gegebenen System sich bewegender Körper jegliche äußere Einwirkung fehlt und sich keine mechanische Energie in andere Energieformen umwandelt, so verändert sich die Energie des Systems nicht. Wirken zwischen den Körpern Anziehungs- und Abstoßungskräfte, so wird der Verlust an potentieller Energie durch das Anwachsen der lebendigen Kraft kompensiert. „In allen Fällen der Bewegung freier materieller Punkte unter dem Einfluß ihrer anziehenden oder abstoßenden Kräfte, deren Intensitäten nur von der Entfernung abhängig sind, ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft und der Gewinn der ersteren dem Verlust der letzteren. *Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte konstant.*"[34]

Der Begriff der Spannkraft bzw. der potentiellen Energie ist ein weiterer Schritt in der Entwicklung der Grenzbegriffe der Mechanik. In der Newtonschen Mechanik war die Kraft, die auf einen gegebenen Körper wirkt, ein Grenzbegriff, weil die Frage nach ihrem Ursprung über die Mechanik hinausführte. Der Begriff des potentiellen Feldes bildete noch keinen neuen Grenzbegriff, bereitete ihn aber vor. Der Begriff der potentiellen Energie änderte dagegen die Beziehungen zwischen Mechanik und Physik. In einer Reihe von Prozessen entsteht oder verschwindet mechanische Energie. Als Beispiel sei hier nur der unelastische Stoß genannt. Die mechanische Gesamtenergie ändert sich durch den Übergang nichtmechanischer Energieformen in mechanische und umgekehrt.

Somit verändern die Grenzbegriffe der Mechanik ihren Charakter. In der Newtonschen Mechanik war die Kraft ein Grenzbegriff im absoluten Sinne. In der Mechanik von Lagrange, der in dieser Beziehung die Leibnizsche Tradition fortsetzte, wurde die skalare Größe der lebendigen Kraft zum Grenzbegriff. Somit ließ die Mechanik in ihrer Entwicklung eine nichtmechanische Verallgemeinerung ihrer Begriffe zu. Diese Verallgemeinerung wurde in den vierziger Jahren vorgenommen. Der Begriff der mechanischen Gesamtenergie veränderte die Beziehung zwischen Mechanik und Physik, weil er aufhörte, eine Grenze zu sein, hinter der es keine wissenschaftlichen Begriffe mehr gab, und zum Übergang zu anderen, nichtmechanischen Bereichen wurde. Die Umwandlung von kinetischer in potentielle Energie im rein mechanischen Bereich schloß nichtmechanische

[34] Ebenda, S. 14.

Prozesse aus. Erscheinungen wie Reibung und unelastischer Stoß führten dagegen von der mechanischen Gesamtenergie direkt zur Vorstellung nichtmechanischer Formen der Energie. Es zeigte sich, daß die Mechanik nicht alle Gesetzmäßigkeiten der Welt erfaßt und sich durch ihre Grenzbegriffe nicht nur von anderen Gebieten abgrenzt, sondern auch mit ihnen verbindet. Neben der mechanischen Energie existieren andere Energieformen, die mit der mechanischen durch quantitative Äquivalente verbunden sind. Das Prinzip der Erhaltung der Energie in der Form der vierziger Jahre bedeutete das Ende der mechanischen Physik oder zumindest den Anfang vom Ende. Das gilt nicht nur für Mayer, sondern auch für Helmholtz. Mayer entwickelte die Vorstellung von nichtmechanischen Energieformen, die den mechanischen äquivalent sind, und fand am Beispiel der Wärme die quantitative Beziehung des Überganges. Helmholtz bemühte sich dagegen um ein einheitliches mechanisches Weltbild, in dem alle physikalischen Prozesse auf die Mechanik zurückführbar sind. Aber diese Bemühungen waren nicht von Erfolg gekrönt. Die Forschungen von Helmholtz, denen die Physik weitgehend die Bestätigung und den Sieg des Energieprinzips verdankt, führten unabhängig von den Wünschen ihres Urhebers zur Überwindung der mechanischen Begrenztheit der Naturwissenschaft.

Von den weiteren Abschnitten der Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft“ haben diejenigen über Elektrizität und Magnetismus die größte Bedeutung. Die Mechanik hatte bereits früh zur wissenschaftlichen Strenge und zu einem logisch abgerundeten System gefunden. Seit Lagrange war die Idee der Erhaltung in ihren Begriffen und Beziehungen enthalten. Jetzt mußten lediglich einige bekannte Gesetze umformuliert werden. In der Wärmelehre hatte der erste Hauptsatz in seiner heuristischen Form dem Prinzip der Entropie den Vortritt gelassen. Deshalb wirkte das Gesetz von der Erhaltung der Energie heuristisch am stärksten in der Elektrodynamik.[35]

In der Thermodynamik rundete der Vortrag von Helmholtz eine Zahl von Entdeckungen der vierziger Jahre ab. Die fünfziger Jahre begannen auf diesem Gebiet mit der Arbeit von Clausius „Über die bewegende Kraft der Wärme ...“[36] In ihr wurde vor allem die Idee Carnots vom Übergang einer konstanten Wärmemenge aus dem Kessel in den Kondensator einer Wärmemaschine widerlegt. Nach Carnot erhält ein Körper, der einen Kreisprozeß durchläuft und in seinen Anfangszustand zurückkehrt, d. h. zu den Ausgangswerten der Temperatur und des Volumens, im Verlaufe dieses Prozesses so viel Wärme von außen, wie er anderen Körpern abgibt. Diese Menge hängt nach Carnot nicht vom Verlauf des Zyklus und von der geleisteten Arbeit ab, sondern wird lediglich durch den erreichten Zustand bestimmt. Nach Clausius kann die Wärmemenge nicht nur eine Funktion des Zustandes sein, sie ist von dem vorhergegangenen Verhalten des Systems, von der äußeren Arbeit abhängig, die vom System im Verlaufe des Kreisprozesses geleistet wurde, von den Wegen des Überganges zum gegebenen Zustand.

[35] Vgl. M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, a. a. O., S. 226–228.
[36] R. Clausius, Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen, Leipzig 1921.

Vom Zustand des Systems hängt auch eine andere Größe ab, die Helmholtz die Quantität der Wärme nannte, die ein Körper enthält. Es ist die Summe der lebendigen Kraft der Moleküle und der Spannkräfte. Clausius nannte sie innere Energie des Körpers.[37]

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die klassische Thermodynamik. Clausius, W. Thomson und danach Maxwell, Boltzmann und Gibbs sowie viele andere Physiker vereinigten die phänomenologischen Gesetze der Energieumwandlung mit den kinetischen Modellen der Gastheorie. Dabei erhielt die aktive Seite des Energiesatzes ständig wachsende Bedeutung. Das Prinzip entwickelte sich zu einem System energetischer Transformationen, das das gesamte Weltall umfaßt. Es versinnbildlichte die kosmische Entwicklung, innerhalb deren sich diskrete Teile der Materie — Träger spezifischer Formen der Bewegung — herausbilden, entwickeln und wieder vergehen.

Die Elektrodynamik, die Mitte des Jahrhunderts durch das Energieprinzip starke Impulse erhalten hatte, trug ihrerseits zur Konkretisierung und Verallgemienerung des Energieprinzips bei. In der Elektrodynamik der achtziger Jahre erhielt die von N. A. Umov allgemein formulierte Idee einer Lokalisation der Energie im Raum ihre weitgehend konkrete Form. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie verband die Physik auf eine völlig andere Weise, als das im 17. und 18. Jahrhundert und Anfang des 19. Jahrhunderts der Fall war. Damals kam die Einheit der Physik im Gedanken universeller mechanischer Erklärungen, in der Identität der Bewegungsformen, ihrer Zurückführung auf die Ortsveränderung qualitätsloser Teilchen zum Ausdruck. Jetzt wird die Physik durch das Energieprinzip zusammengefaßt, das nicht nur die Konstatierung eines quantitativen Äquivalents, sondern auch die Idee qualitativer Vielfalt und qualitativer Transformationen der Energie enthält.

Die Zeit für eine philosophische Verallgemeinerung des physikalischen Weltbildes war gekommen. Engels gab sie in seiner „Dialektik der Natur“ und im „Anti-Dühring“. Im Vorwort zur zweiten Ausgabe des „Anti-Dühring“ (1885) schrieb er über die Revolution der Dialektik in der Naturwissenschaft, die sich mit der notwendig gewordenen Systematisierung der neuen Entdeckungen durchsetzte. In diesem Zusammenhang sprach Engels von der neuen Auffassung des Energiesatzes als positiver und qualitativer Lehre von der Umwandlung der Energie bei Erhaltung ihrer allgemeinen quantitativen Größen.[38]

5. *Die Definition der Energie und die Bearbeitung des Erhaltungsprinzips durch Max Planck*

Im gleichen Jahr, da Engels sein Vorwort zur zweiten Ausgabe des „Anti-Dühring“ schrieb, begann der Physiker Max Planck seine Arbeit „Das Prinzip der Erhaltung der Energie“, in der das Energieprinzip in seiner historischen Ent-

[37] R. Clausius, Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, Bd. 1, Braunschweig 1864, S. 281.

[38] F. Engels, Anti-Dühring, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, a. a. O., S. 13.

wicklung und Bedeutung systematisch dargelegt wurde. Diese Arbeit, die 1887 erschien, war ein Beitrag zur Lösung der 1884 von der Philosophischen Fakultät der Göttinger Universität ausgeschriebenen Preisaufgabe. In ihr kommt die bereits von Engels charakterisierte neue Auffassung des Energieprinzips klar zum Ausdruck.

Planck gibt hier eine Definition der Energie, die nicht von vornherein das Erhaltungsprinzip voraussetzt. Man kann die Energie als Funktion der Lage, der Geschwindigkeit, der Temperatur und anderer Parameter definieren, die den Zustand eines Systems bestimmen. Ein solches Vorgehen setzt die Energieerhaltung voraus. Es gibt jedoch eine Möglichkeit der Definition, die diese Voraussetzung nicht enthält. Eine solche Bestimmung der Energie war bereits von W. Thomson in einem 1851 in Edinburgh gehaltenen Referat gegeben worden.[39] Energie wird hier als ein in mechanischen Arbeitseinheiten gemessener Betrag aller Wirkungen definiert, die außerhalb des Systems hervorgebracht werden, wenn dasselbe aus einem gegebenen Zustand in einen angenommenen Nullzustand übergeht. Der Begriff der „außerhalb des Systems hervorgebrachten Wirkungen" hat einen unmittelbaren Sinn, wenn alle Veränderungen der Lage, der Geschwindigkeiten, der Temperatur und weiterer Eigenschaften der Körper berücksichtigt werden, die nicht im System enthalten sind. Der Einfluß der Gravitation auf ein System gehört zum Beispiel zu den äußeren Wirkungen.[40] Wenn diese äußeren Wirkungen mechanisch sind oder ihr mechanisches Äquivalent bekannt ist, erhält auch der Ausdruck „in mechanischen Arbeitseinheiten gemessen" einen unmittelbaren Sinn. Anderenfalls muß dieses Äquivalent bestimmt werden, indem man die Menge der mechanischen Arbeit errechnet, die diese äußere Wirkung vollbringt oder aus der sie erhalten werden kann.

Eine solche Definition der Energie sagt noch nichts über ihre Erhaltung aus. Erhaltung der Energie bedingt Eindeutigkeit bei der Bestimmung des Systems hinsichtlich eines Nullzustandes, Konstanz des gesamten mechanischen Äquivalents der Wirkungen, die außerhalb des Systems beim Übergang aus einem gegebenen in einen Nullzustand wirken, unabhängig von den Formen des Überganges. Diese Unabhängigkeit setzt keine Definition voraus, sondern ergibt sich durch das Experiment. Das Prinzip der Erhaltung der Energie ist somit keine bereits in der Definition enthaltene Forderung a priori, sondern eine empirisch gewonnene Beziehung.

Aus einem so formulierten Erhaltungsprinzip der Energie folgt die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile.[41] Der Nullzustand wird willkürlich bestimmt, er kann dem gegebenen Zustand gleichgesetzt werden. Somit folgt aus der Unabhängigkeit der Energie (die im gegebenen Zustand gleich Null ist) von den Formen des Überganges, daß das mechanische Äquivalent der äußeren Wirkungen eines Systems, das nach beliebigen Umwandlungen in seinen Anfangszustand zurückkehrt (d. h. einen Kreisprozeß durchlaufen hat), gleich Null ist.

Diese Form des Energieprinzips und der Definition der Energie ist verallgemeinerungsfähig. Planck hat in seiner Arbeit eine solche Verallgemeinerung

[39] Vgl. Phil. Mag., Bd. 4, 1852, S. 8ff., 105ff., 168ff., 424ff.

[40] M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, a. a. O., S. 104.

[41] Ebenda, S. 111.

vorgenommen.[42] Energie ist demnach die Summe aller äußeren Wirkungen, die beim Übergang eines Systems aus dem Zustand A in den Nullzustand N vonstatten gehen. Diesem Prozeß $A \to N$ kommt die Energie $[AN]$ zu. Entsprechend ist die Energie eines Systems beim Übergang aus dem Zustand B in den gleichen Nullzustand $[BN]$. Hieraus kann die Arbeit $[AB]$ bestimmt werden, die die äußeren Wirkungen beim Übergange $A \to B$ leisten.

$$[AB] = [AN] - [BN].$$

Wenn dieser Übergang keine äußeren Wirkungen enthält, ist $[AB] = 0$ und demzufolge $[AN] = [BN]$. Die Energie des Systems verändert sich nicht, wenn der Übergang von einem Zustand in einen anderen keine äußeren Einwirkungen aufweist, sich nur auf innere Wirkungen beschränkt. Das ist das Prinzip der Erhaltung der Energie ohne äußere Einwirkungen. Die konstant bleibende Energie ist im System lokalisiert. Die Energie eines Systems mit einem angenommenen Nullzustand ist durch einen gegebenen augenblicklichen Zustand vollkommen bestimmt. Sie erhält bei inneren Vorgängen ihre quantitative Größe, verändert aber ihre Form. Die konstante Größe wird durch eine Summe verschiedener Energieformen gebildet.

Planck nennt diesen Energiebegriff substantiell und verweist damit auf eine Analogie: In chemischen Prozessen bleibt die Masse der beteiligten Stoffe erhalten, aber ihre chemischen Bindungen ändern sich, so wie bei der Energieumwandlung die Menge der Energie erhalten bleibt, die einzelnen Formen sich aber ineinander umwandeln.

Diese Auffassung von der Energie enthält jedoch im Vergleich zur Bestimmung durch die äußeren Wirkungen eine gewisse Ungenauigkeit. Der Wert der Arbeit aller äußeren Einwirkungen kann ohne eine Hypothese über die Lokalisation der Energie im Inneren des Systems bestimmt werden. Die neue Definition ist von solchen Hypothesen abhängig. Um die Energie als Summe verschiedener Formen der Energie zu behandeln, muß man ganz bestimmte physikalische Annahmen einführen. Zum Beispiel ist die elektrostatische Energie eines Systems von Ladungen im Zustand des Gleichgewichts nach der ersten Art eindeutig bestimmt. Im letzteren Falle muß erst geklärt werden, ob die Energie im Dielektrikum oder in den Ladungen zu suchen ist, die auf der Oberfläche der Leiter ihren Platz haben und sich nach dem Prinzip der Fernwirkung gegenseitig beeinflussen.

Aber diese Unbestimmtheit verleiht dem Begriff der Energie seinen heuristischen Wert. Sie wird zur physikalischen Aufgabe. „Man wird sich nun nicht mehr damit begnügen", schreibt Planck, „den Zahlenwert der Energie des Systems zu kennen, sondern man wird versuchen, die Existenz der verschiedenen Arten der Energie an den verschiedenen Elementen des Systems im einzelnen nachzuweisen, und den Übergang in andere Formen und zu anderen Elementen ebenso verfolgen wie die Bewegung eines Quantums Materie im Raum."[43]

[42] Ebenda, S. 112–115.
[43] Ebenda, S. 117–118.

Der Übergang von der „äußeren“ zur „inneren“ Bestimmung der Energie ermöglichte schließlich, die Energie als Vielfalt mehr oder weniger lokalisierter Elemente zu sehen, die mit lokalisierten stofflichen Elementen verbunden sind. Damit ist die Entwicklung des Energieprinzips in den sechziger bis achtziger Jahren in ihren wesentlichen Zügen gekennzeichnet. Die hier dargelegten Ansichten Plancks fassen die bisherigen Ergebnisse zusammen und nehmen weitere noch entscheidendere Schritte vorweg, die zum mikroskopischen Bild der Lokalisation und der Umwandlung der Energie führen.

Mit seinen „substantiellen“ Vorstellungen von der Energie präzisiert Planck den Begriff der inneren Wirkungen des Systems. Die Bestimmung dieser Wirkungen hängt von den Grenzen des Systems ab: wir können jede äußere Wirkung dadurch zu einer inneren machen, daß wir die Körper, in denen oder zwischen denen sie stattfinden, mit in das System einbegriffen denken. Dieser Prozeß ist unabschließbar. Es werden immer äußere Körper zurückbleiben, die auf das System einwirken und von ihm beeinflußt werden. Dessenungeachtet kann jedoch immer ein System gefunden werden, dessen äußere Einwirkungen so gering sind, daß man sie vernachlässigen kann.[44] Wir haben es hier mit einer Beziehung zu tun, die A. S. Eddington später Konvergenzprinzip nannte.[45] Die Energieerhaltung gilt im strengen Sinne, wenn es keinerlei äußere Einwirkungen gibt, wenn das System das ganze unendliche Weltall umfaßt. Aber es ist mit hinreichender Genauigkeit auf jedes annähernd isolierte System anwendbar. Mit einer unendlichen Annäherung an eine ideale Isolation wächst die Genauigkeit des Energieprinzips im System. Erweitern wir das System, so erhalten wir eine konvergierende Reihe.

Das Energieprinzip vergleicht, von seiner „inneren“ Seite her betrachtet, die Energiedifferenz zweier beliebiger Zustände mit einem Nullzustand.

Worin besteht nun diese Zustandsänderung des Systems? Welche physikalischen Prozesse gehen in ihm vor? Die Summe der einzelnen Formen der Energie bleibt konstant, „es läßt sich also jeder Prozeß, der in der Natur vor sich geht, auffassen als eine Umwandlung einzelner Energiearten ineinander, während ihre Summe, der gesamte im System vorhandene Vorrat von Energie, weder vermehrt noch vermindert werden kann“[46]. Somit führt die „innere“ Definition der Energie und ihrer Erhaltung zu einer positiven und qualitativen Auffassung des Prinzips der Energieerhaltung.

Ende des 19. Jahrhunderts war die mechanische Weltanschauung durch die Ergebnisse der klassischen Physik, besonders aber durch die der Thermodynamik (Irreversibilität) und der Elektrodynamik (Realität des Feldes) in ihren Grundfesten erschüttert. Planck bezeichnete noch in den achtziger Jahren die mechanische Deutung als einen idealen Typ der physikalischen Erklärung von Prozessen. Aber er hielt einen Mißerfolg der universalen mechanischen Naturbetrachtung bereits für prinzipiell möglich. Er sah deshalb von einer Ableitung des

[44] Ebenda, S. 119.
[45] A. S. Eddington, Raum, Zeit und Schwere, Braunschweig 1923, S. 158.
[46] M. Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, a. a. O., S. 133.

Energiegesetzes auf der Grundlage universeller Zentralkräfte ab. Planck war geneigt, das Energiegesetz als grundlegendes Prinzip der Physik anzuerkennen, das von der Annahme eines mechanischen Weltbildes unabhängig war und sich nur auf die empirisch nachgewiesene Unmöglichkeit eines perpetuum mobile stützte. Wir werden im nächsten Kapitel sehen, daß Planck auch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ganz analog behandelte.

Die Wissenschaft erfaßte in ihrer Entwicklung den neuen nichtmechanischen Begriff der Bewegung immer exakter und auch quantitativ genauer. Wenn man einen Körper vom Standpunkt der Mechanik betrachtet, kann man ihm außer der Masse noch räumliche Prädikate zuschreiben (Koordinaten und ihre Ableitungen — Geschwindigkeit und Beschleunigung), des weiteren einen bestimmten Impuls und eine Energiemenge, die von der Lage (potentielle) oder von der Lageänderung (kinetische) des Körpers abhängt. Die Thermodynamik dagegen untersucht den makroskopischen ruhenden Körper. Die Bewegung eines Systems materieller Punkte als Ganzes wird ignoriert. Somit wird auch die Veränderung der potentiellen und kinetischen Energie, die aus der Bewegung des Gesamtsystems resultiert, nicht berücksichtigt. Die restliche innere Energie ist vom Zustand des Systems abhängig. Um diese Abhängigkeit zu bestimmen, wird der Begriff des adiabatischen Prozesses eingeführt, bei dem der Wärmeaustausch zwischen dem System und anderen Körpern ausgeschlossen ist. Der Zustand des Systems kann sich somit nur durch Veränderung seiner mechanischen Parameter ändern. Die Arbeit, die bei einem adiabatischen Prozeß verrichtet wird, ist gleich der Differenz der inneren Energie zu Anfang und Ende des betrachteten Prozesses. Eine Veränderung der inneren Energie, die dem genannten Resultat der mechanischen Arbeit äquivalent ist, kann jedoch bei einer Zerstörung der adiabatischen Isolation durch Wärmeaustausch herbeigeführt werden. Diese Äquivalenz bedeutet auch Äquivalenz von Wärme und Arbeit, die dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik zugrunde liegt, der spezifischen Form des Energieprinzips für Prozesse, in denen die Wärme eine wesentliche Rolle spielt.

VI. IRREVERSIBILITÄT

1. Sadi Carnot und das Prinzip der Irreversibilität

Das Irreversible, nicht Umkehrbare, nur in eine Richtung des Zeitverlaufes Fortschreitende gehört zu den augenscheinlichsten menschlichen Vorstellungen. Aus ihnen resultiert jener Eindruck absoluter Unwahrscheinlichkeit, den wir bei einem rückwärts laufenden Film oder bei der Lektüre der „Zeitmaschine" von Wells erhalten.[1] Die Empfindung der Nichtumkehrbarkeit der Zeit bildet sich durch Beobachtungen der lebendigen Natur und der physikalischen Prozesse heraus. Die Mechanik ruft dagegen solche Empfindungen nicht hervor. Wenn wir einen rückwärts laufenden Film betrachten und eine Lokomotive dadurch rückwärts fahren sehen, so ist das durchaus nicht unwahrscheinlich. Wenn sich jedoch der Dampf in der Atmosphäre sammelt und in den Schornstein zurückkehrt, so erscheint uns das völlig unmöglich.[2] Ein Kreislauf der Zeit wirkt absurd, sobald wir es mit physikalischen Prozessen zu tun haben. Sogar die alltäglichen Erfahrungen trennen streng zwischen mechanischen Veränderungen und komplizierten Formen der Bewegung. Aus diesem Grunde fand das Prinzip der Irreversibilität, Ergebnis tausendjähriger menschlicher Beobachtungen, in der Physik erst seinen Platz, als molekulare Prozesse zum Gegenstand experimenteller und theoretischer Untersuchungen wurden. Das geschah aber erst, nachdem die Molekularbewegung bereits in der Produktion ausgenutzt wurde.

Das Gravitationsgesetz Newtons, die Theorie Darwins und sogar das Relativitätsprinzip Einsteins vollendeten jeweils seit langem bestehende und sich entwickelnde Tendenzen in der Wissenschaft. Das von Carnot formulierte Prinzip der Irreversibilität des Wärmeüberganges von einem warmen zu einem weniger warmen Körper hat keine solchen Wurzeln. Wahrscheinlich erkennt man gerade deshalb in den „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers ..." die produktionstechnischen Wurzeln der Theorie so deutlich. An der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert und zu Beginn des 19. Jahrhunderts interessierten sich die Konstrukteure der Dampfmaschinen vor allem für zwei Probleme der allgemeinen Theorie der Dampfmaschine: Gibt es eine Grenze für die Verbesserung des Wirkungsgrades der Kraftmaschinen? Weisen bestimmte in der Dampfmaschine verwendete Wärmeträger prinzipielle Vorzüge gegenüber anderen auf? Diese Probleme wollte Carnot in seinen „Betrachtungen" lösen. Für den Wissenschafts-

[1] Vgl. E. Meyerson, Identität und Wirklichkeit, a. a. O., S. 222.
[2] Ebenda, S. 223.

historiker ist wesentlich, daß sie auch für die Techniker zu dieser Zeit interessant wurden. Unmittelbar nach dem Einsatz der Dampfmaschinen in England und auf dem Kontinent war die Effektivität weder Gegenstand vergleichender Bewertungen noch unmittelbares Ziel konstruktiver Verbesserungen. Die Dampfmaschine befreite die Produktion von der Standortgebundenheit an Wasserläufen, und das rechtfertigte bereits ihren Einsatz. Im Laufe der Zeit wurde jedoch der Verbrauch von Heizmaterial zum Kriterium, wenn nicht für den Einsatz der Maschine — sie hatte keinen Vergleich zu fürchten —, so doch für die Wahl dieser oder jener Konstruktion aus der Vielzahl der angebotenen Modelle. Jetzt führte die Arbeit der Konstrukteure unmittelbar zu allgemeinen Problemen. Eine Vielzahl von Konstruktionen mußte mit einer idealen Kraftmaschine maximaler Effektivität verglichen werden. Wovon hängt die Effektivität einer solchen idealen Kraftmaschine ab? Ist sie begrenzt? Verändert sie sich, wenn statt Wasserdampf andere Wärmeträger verwendet werden?

Alle diese Fragen stellte sich Carnot. Er schrieb: „Um das Prinzip der Erzeugung von Bewegung durch Wärme in seiner ganzen Allgemeinheit zu betrachten, muß man es sich unabhängig von jedem Mechanismus und jedem besonderen Agens vorstellen; man muß Überlegungen durchführen, welche ihre Anwendung nicht nur auf Dampfmaschinen haben, sondern auf jede denkbare Wärmemaschine, welches auch der angewandte Stoff sei, und in welcher Art man auf ihn einwirkt."[3]

Danach erörterte Carnot den prinzipiellen Unterschied zwischen mechanischen Maschinen und Wärmekraftmaschinen. Die ersteren lassen sich bis zu den detailliertesten Prozessen durch mechanische Gesetzmäßigkeiten erklären. Für die letzteren gibt es noch keine entsprechend umfassende Theorie. „Die Maschinen, welche ihre Bewegung nicht von der Wärme empfangen, wie die, deren Antrieb die Kraft der Menschen oder Tiere, der Fall des Wassers, die Strömung der Luft usw., ist, können bis in ihre kleinsten Einzelheiten mittels der theoretischen Mechanik studiert werden. Alle Fälle sind vorgesehen, alle möglichen Bewegungen sind allgemeinen festbegründeten Prinzipien unterworfen, welche unter allen Umständen Anwendung finden. Das ist das Kennzeichen einer vollständigen Theorie. Offenbar fehlt eine ähnliche Theorie bei den Wärmemaschinen. Man wird sie erst besitzen, wenn die Gesetze der Physik genügend ausgedehnt und verallgemeinert sind, um von vornherein alle Wirkungen festzustellen, welche die Wärme ausübt, wenn sie sich in bestimmter Weise an einem beliebigen Körper betätigt."[4]

Diese Zeilen der Arbeit von Carnot kann man ihrer historischen Bedeutung nach mit den einleitenden Sätzen von Galileis „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend" vergleichen, die auf das venezianische Arsenal eingehen. Die technische Ausrüstung des Arsenals hinterließ bei Galilei gerade deswegen so starke und fruchtbare Eindrücke, weil sie, wie Carnot mehr als zweihundert

[3] S. Carnot, Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen, Leipzig 1892, S. 6–7.
[4] Ebenda, S. 7.

Jahre später feststellte, vollständig durch die Theorie der Mechanik erklärt werden konnte. Galilei erweiterte ihren Wirkungsbereich auf die Welt der Himmelskörper und schuf eine allgemeine und universelle Bewegungstheorie für alle Naturkörper von den kleinsten Teilchen bis zur Sonne und zu den Planeten. Diese Theorie erhielt bei Descartes den Charakter eines einheitlichen kinematischen Weltbildes, das nichts in der Natur anerkannte als stoffliche Teilchen, die sich nach den strengen Gesetzen der Mechanik bewegen. Bei Newton wurde sie zum System eindeutiger allumfassender Gesetze. Die gesamte experimentelle Wissenschaft und die Praxis lieferten hierfür den Beweis.

Jetzt, da die Gesetze der theoretischen Mechanik wieder in die Werkstätten zurückkehren, aus denen sie einst der verallgemeinernde Genius der Wissenschaft des 17. Jahrhunderts abgehoben hatte, finden sie neue Maschinen vor. Die Gesetze sind nicht mehr in der Lage, jedes beliebige Detail der Wirkungsweise dieser Maschinen zu erklären. Wahrscheinlich ahnte Carnot bereits, daß die Prozesse in der Dampfmaschine prinzipiell nicht auf die Beziehungen der theoretischen Mechanik zurückführbar sind. Er sprach in dem zitierten Abschnitt davon, daß eine umfassende Theorie, die in der Lage ist, das Verhalten der Körper bei gegebener Einwirkung der Wärme eindeutig zu bestimmen, erst geschaffen werden kann, wenn die Gesetze der Physik „genügend ausgedehnt und genügend verallgemeinert" sind. Man könnte versucht sein, diesen Satz zu modernisieren. Carnot gab selbst dazu den Anlaß, indem er über die Ausdehnung und Verallgemeinerung der *Physik* im Vergleich zu der die alten Kraftmaschinen erklärenden *Mechanik* schrieb. Wir wollen dieser Versuchung jedoch nicht erliegen. Die Genialität Carnots liegt nicht in der unmittelbaren Vorwegnahme physikalischer Gesetze, die nicht auf die Mechanik zurückführbar sind — dieser Gedanke fand erst in der statistischen Physik seinen Niederschlag, die Carnot nicht kannte —, sondern in konkreten physikalischen Aussagen und Begriffen, die erst viel später eine exakte Erklärung auf der Grundlage statistischer Gesetzmäßigkeiten fanden.

Heute können wir „alle Wirkungen feststellen, welche die Wärme ausübt, wenn sie sich in bestimmter Weise an einem beliebigen Körper betätigt". Die Einwirkungen und ihre Resultate werden lediglich mit einem bestimmten Grade von Wahrscheinlichkeit bestimmt, der praktisch der Zuverlässigkeit der für makroskopische Körper geltenden Gesetze entspricht. Die Mechanismen, die von den klassischen dynamischen Beziehungen bestimmt werden, stellen ihrer Natur nach Gruppen von mikroskopischen Teilchen dar (so nahm es zumindest die klassische Thermodynamik an). Das statistische Ensemble besitzt allerdings spezifische Eigenschaften und ist besonderen Gesetzmäßigkeiten unterworfen, vor allem dem Prinzip der Irreversibilität.

Bis zu Boltzmann war dieses Prinzip nicht auf diese Art mit der Mechanik verknüpft. Bis zu Clausius und W. Thomson war es überhaupt nicht mit der Vorstellung bewegter Teilchen verbunden. Wie konnte auch eine Beziehung zwischen der Irreversibilität und der Mechanik in den Grenzen der makroskopischen Theorie hergestellt werden? Das war nur auf fiktive Art und Weise, mit Hilfe eines hypothetischen Wärmestoffes und der Vorstellung über das Gleichgewicht eines unzerstörbaren Fluidums möglich.

Die Schlußbetrachtungen der Carnotschen Arbeit zeigen die produktionstechnischen Wurzeln der Thermodynamik allgemein und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik insbesondere. Hier werden konkrete Verbesserungen der Dampfmaschine verfolgt, Daten aus Patenten, Aufsätze aus der „Enzyklopaedia Britannica" usw. angeführt. Die Dampfmaschine war hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, ihrer Festigkeit, ihrer Dauerhaftigkeit und vor allem ihrer Effektivität verbessert worden. Die Effektivität erhöhte sich vor allem durch die Entwicklung von Hochdruckdampfmaschinen. Carnot tat den ersten Schritt zu einer allgemeinen Theorie und betrachtete die Wärmekraftmaschine als ideales Schema, dessen Eigenschaften nicht von dem verwendeten Wärmeträger abhängen. Er tat auch den zweiten Schritt, indem er die Versuche zur Anwendung hohen Druckes verallgemeinerte und nachwies, daß bei hohem Druck ein großes Temperaturgefälle wirksam werden kann.

Nach Meinung Carnots tritt in der Dampfmaschine der aus dem Brennmaterial gewonnene Wärmestoff durch die Wand des Kessels, verwandelt das Wasser in Dampf und vereinigt sich mit diesem. Der Dampf trägt den Wärmestoff mit sich fort. Dieser leistet im Zylinder mechanische Arbeit und gelangt dann in den Kondensator, wo ihn das kalte Wasser aufnimmt. Somit beruht die Arbeit einer Wärmemaschine auf der Wiederherstellung des Wärmestoffgleichgewichtes, auf seinem Übergang von einem Körper mit hoher Temperatur zu einem anderen mit niedrigerer Temperatur. Die aus dem Kessel abgeleiteten Gase sind bei ihrem Austritt kälter als im Moment der Verbrennung. Das kalte Wasser, das den Kondensator durchläuft, erwärmt sich. „Die Erzeugung von bewegender Kraft ist daher bei den Dampfmaschinen nicht sowohl auf einen wirklichen Verbrauch des Wärmestoffes zurückzuführen, *sondern auf seinen Übergang von einem heißen Körper zu einem kalten*, d. h. auf die Herstellung seines Gleichgewichts, welches durch irgendeine Ursache, eine chemische Wirkung, wie die Verbrennung, oder irgendeine andere gestört worden war."[5]

Das Prinzip der Entropie ist also noch sehr weit von seiner späteren kinetischen Interpretation entfernt. In seinen „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers ..." vertritt Carnot (mit den bereits angeführten Vorbehalten) die Existenz der unzerstörbaren Substanz eines Wärmestoffes. Deshalb tritt das Prinzip der Entropie hier als Prinzip des nichtumkehrbaren Gleichgewichtes des Wärmestoffes in Erscheinung.

„Nach diesem Prinzip", fährt Carnot fort, „genügt es zur Gewinnung bewegender Kraft nicht, Wärme hervorzubringen: man muß auch Kälte verschaffen; ohne sie wäre die Wärme unnütz. In der Tat, wären um die Feuerung nur Körper vorhanden, welche ebenso heiß sind wie diese, wie könnte man die Verdichtung des Dampfes erlangen? Wo würde man ihn hinbefördern, nachdem er einmal entstanden ist? Man darf nicht glauben, daß man ihn, wie dies bei gewissen Maschinen geschieht, in die Luft treiben könnte: die Luft würde ihn nicht aufnehmen. Sie nimmt ihn unter den gegenwärtigen Verhältnissen nur auf, weil sie ihm gegenüber

[5] Ebenda, S. 8.

wie ein ungeheurer Kondensator wirkt, weil sie sich bei niedrigerer Temperatur befindet; sonst wäre sie bald gesättigt, oder vielmehr, sie wäre es von vornherein."[6]

Carnot behandelt dann dasselbe Problem unter positivem Aspekt. „Überall, wo ein Temperaturunterschied besteht, und wo daher die Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffes eintreten kann, kann auch die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden. Der Wasserdampf ist ein Mittel zur Erlangung dieser Kraft, aber er ist nicht das einzige; alle Stoffe der Natur können zu diesem Zwecke benutzt werden; alle sind fähig, Volumänderungen, folgeweise Zusammenziehungen und Ausdehnungen durch den Wechsel der Wärme und Kälte zu erfahren; alle sind fähig, bei ihren Volumänderungen bestimmte Widerstände zu überwinden, und auf diese Weise bewegende Kraft zu entwickeln."[7]

Als Beispiel dient ein eiserner Stab, der sich bei Erwärmung ausdehnt und bei Abkühlung zusammenzieht. Gasförmige Körper verändern ihr Volumen in Abhängigkeit von der Temperatur sehr stark. Deshalb nutzt man gerade sie in den Wärmemaschinen aus. Prinzipiell unterscheidet sich dieser Prozeß nicht von jeder anderen Art der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit. Der Dampf kann in der Wärmemaschine wirksam werden, ohne zu kondensieren. Er verbleibt in demselben Aggregatzustand und verrichtet seine Arbeit auf Kosten von Volumen- und Druckänderungen in Abhängigkeit von der Temperatur. Verwendbar ist hierfür nicht nur Wasserdampf, sondern auch der Dampf aller anderen Stoffe, die in den gasförmigen Zustand übergehen können. In allen diesen Maschinen entsteht bewegende Kraft durch Herstellung des Gleichgewichtes des Wärmestoffes. Die Wärme ist Ursache der mechanischen Arbeit, insofern sie das Volumen oder die Form eines Körpers verändert. Diese Veränderungen werden durch Temperaturveränderungen hervorgerufen. Um jedoch die Temperatur zu verändern, sind zwei Körper notwendig, zwischen denen ein Temperaturgefälle besteht. Wird der Wärmestoff vom ersten zum zweiten Körper übertragen, sind die dazwischenliegenden Körper gezwungen, ihr Volumen zu ändern und mechanische Arbeit zu leisten.

Nach Meinung Carnots kann überall, wo eine Temperaturdifferenz vorhanden ist, eine bewegende Kraft entstehen. Auch das umgekehrte Theorem ist richtig: wird mechanische Arbeit geleistet, kann ein Temperaturunterschied entstehen, kann das Gleichgewicht des Wärmestoffes gestört werden. Als Beispiel seien Stoß und Reibung angeführt, die dem Körper eine höhere Temperatur zuführen, als sie das umgebende Medium besitzt. Wird Gas oder Dampf komprimiert, erhöht sich die Temperatur. Der Wärmestoff wird ungleichmäßig verteilt und kann somit wiederum Arbeit leisten. Somit kommt ein Kreisprozeß zustande.

„Hat man aber beide Male mit der gleichen Dampfmenge gearbeitet", schlußfolgert Carnot, „und hat keinerlei Verlust, weder an Wärmestoff, noch an bewegender Kraft stattgefunden, so wird die Menge der im ersten Falle erzeugten bewegenden Kraft der gleich sein, welche im zweiten Falle verbraucht wurde, und die Menge des im ersten Falle von *A* nach *B* übergegangenen Wärmestoffes

[6] Ebenda, S. 8–9.
[7] Ebenda, S. 9.

wird der Menge gleich sein, welche im zweiten Falle von B nach A zurückkehrt, so daß man eine unbegrenzte Anzahl von Malen abwechselnde Operationen dieser Art wiederholen kann, ohne daß schließlich weder bewegende Kraft hervorgebracht, noch Wärmestoff von einem Körper zum anderen übertragen ist."[8]

Wenn man aus dem Wärmestoff mehr mechanische Arbeit gewinnen könnte als durch den idealen Zyklus einer Dampfmaschine, so wäre es möglich, einen Teil dieser Kraft für die Rückführung des Wärmestoffes aus dem Kondensator in die Feuerung zu verwenden, den Anfangszustand wieder herzustellen und ihn wiederum in mechanische Arbeit umzuwandeln. Auf diese Weise wäre es möglich, ohne Verbrauch von Wärmestoff und irgendwelcher anderer Agenzien laufend bewegende Kraft zu erzeugen.

„Eine solche Erschaffung steht in völligem Gegensatz zu den gegenwärtig angenommenen Ideen, zu den Gesetzen der Mechanik und einer gesunden Physik; sie ist daher unzulässig. Man muß somit schließen, daß das Maximum an bewegender Kraft, welches sich aus der Anwendung des Dampfes ergibt, gleichzeitig das Maximum der bewegenden Kraft ist, welches sich durch jedes beliebige Mittel erzielen läßt."[9] Für Carnot ist somit die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile Axiom. Auf dieser Grundlage beweist er die Notwendigkeit eines Temperaturgefälles.

2. Der Begriff der Entropie bei William Thomson und Rudolf Clausius

Die negative und rein quantitative Bestimmung der Unzerstörbarkeit der Bewegung war historisch mit der Vorstellung einer absoluten Grenze zwischen Wärme und Bewegung verbunden. Die Unzerstörbarkeit der Wärme in ihrer konkreten Form wurde vorausgesetzt, die Wärme als unzerstörbare Substanz, als Wärmestoff angenommen. Auf der Grundlage einer Wärmestofftheorie konnte die Notwendigkeit eines Temperaturgefälles aus der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile abgeleitet werden. Das hatte Carnot getan. Nach den Arbeiten Mayers und der Entwicklung einer kinetischen Gastheorie konnte man aber nicht mehr behaupten, daß Arbeit auf Kosten einer Umverteilung des unzerstörbaren Wärmestoffes geleistet werden kann. Nach der mechanischen Wärmetheorie mußte in der Dampfmaschine wie auch in jeder anderen Wärmekraftmaschine mechanische Arbeit auf Kosten der Wärme entstehen. Auch unter angenommenen idealen Verhältnissen mußte weniger Wärme in den Kondensator gelangen, als in der Feuerung erzeugt worden war. Unter diesen Bedingungen wird das Prinzip der Irreversibilität zu einem selbständigen Prinzip, das vom ersten Hauptsatz der Wärmelehre unabhängig ist. Clausius, W. Thomson und andere Wissenschaftler wiesen dies nach und entwickelten aus dem Carnotschen Prinzip den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre.

Mitte des 19. Jahrhunderts kehrte die Physik mit den Arbeiten von Karl Krönig und Rudolf Clausius zu den Anschauungen des 17. und 18. Jahrhunderts

[8] Ebenda, S. 13.
[9] Ebenda, S. 14–15.

zurück, die die Wärmeerscheinungen durch eine ungeordnete Bewegung von Teilchen erklärten. Den Molekülen wurde eine geradlinige Bewegung zwischen zwei Zusammenstößen zugeschrieben. Durch diese fortschreitende Bewegung wurde der Gasdruck erklärt, der nach dem Impulserhaltungssatz der mittleren kinetischen Energie der Moleküle proportional sein sollte.

Die Entwicklung einer kinetischen Gastheorie war für die Geschichte der Atomistik von entscheidender Bedeutung. Schon das 18. Jahrhundert kannte eine Hierarchie diskreter Stoffteilchen. Die Vorstellung von Molekülen, deren Bewegung den physikalischen Erscheinungen, und von Atomen, deren Bewegung den chemischen Prozessen zugrunde liegt, gehörte jedoch dem 19. Jahrhundert an. Erst zu dieser Zeit wurden Begriffe und Beziehungen der physikalischen und chemischen Atomistik wie das Molekular- und Atomgewicht, das Daltonsche Gesetz, das Gesetz von Avogadro und andere Gesetze exakt definiert. Erst auf dieser Grundlage wurden die Vorstellungen von einer Hierarchie diskreter Teilchen und der Spezifik physikalischer und chemischer Erscheinungen für die Wissenschaft fruchtbar.

In der Folge wurden die molekularen Prozesse von den makroskopischen Erscheinungen abgegrenzt und durch die statistische Konzeption der Irreversibilität in ihrer Spezifik erfaßt. Dadurch wurde der Boden für die Anwendung statistischer Gesetzmäßigkeiten in der Atom- und Kernphysik und in weiterer Perspektive auch für die statistische Interpretation der Bewegung von Elementarteilchen bereitet.

In den fünfziger und sechziger Jahren des 19. Jahrhunderts leitete die Molekularphysik und die Thermodynamik vor allem makroskopische Beziehungen aus mikroskopischen, atomistischen Vorstellungen der kinetischen Theorie ab. Dabei blieben Auseinandersetzungen nicht aus. Stimmen wurden laut, die die kinetischen Vorstellungen aus der Physik ausschließen, sich auf makroskopische Beschreibung beschränken wollten. Die weiteren Forschungen bekräftigten jedoch den nichteliminierbaren Zusammenhang zwischen kinetischen Vorstellungen und makroskopischer Thermodynamik. Sie deckten darüber hinaus auch den komplizierten Charakter dieser Beziehung auf.

Ausgangspunkt für einen langanhaltenden Konflikt und gleichzeitig für das Bündnis zwischen der makroskopischen Thermodynamik und der kinetischen Theorie waren die Arbeiten von Clausius.[10] Er hatte bereits 1850 das Carnotsche Prinzip mit der mechanischen Wärmetheorie verknüpft. Carnot hatte die Arbeit der Wärme gegenübergestellt, die vom Körper mit der Temperatur Θ_1 zum Körper mit der Temperatur Θ_2 übergeht. Clausius dagegen verglich die Arbeit mit der ihr proportionalen Wärme, die bei einem solchen Übergang verbraucht wird. Er baute somit auf Carnots genialem Gedanken aus den dreißiger Jahren auf, den Mayer erstmalig bekannt gemacht hatte. Clausius verwarf die Idee eines unzerstörbaren Wärmevorrates. Erhalten blieb jedoch die Vorstellung von der Umverteilung der Wärme (ohne ihre Umwandlung in mechanische Arbeit

[10] R. Clausius, Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen, a. a. O.

und ohne Entstehung der Wärme aus mechanischer Arbeit) in Verbindung mit dem von Mayer aufgestellten Prinzip. Nun mußte der Übergang der Wärme von einem Körper zu einem anderen noch mit der Umwandlung der Wärme in Arbeit verbunden und eine quantitative Beziehung zwischen ihnen aufgestellt werden.

Hierbei führte Clausius den Begriff der Entropie ein, einer Funktion des Systemzustandes, die für umkehrbare Prozesse konstant ist. Wenn sich ein System nicht im Wärmegleichgewicht befindet und in ihm irreversible Prozesse vonstatten gehen, wächst die Entropie an. Hierin besteht die Grundidee der Arbeiten von Clausius „Über die bewegende Kraft der Wärme" (1850) und „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie" (1864).[11]

Schon in der ersten der genannten Arbeiten ging Clausius von der Analyse des Kreisprozesses in Wärmekraftmaschinen zu kosmischen Problemen über. Sie spielten in der historischen Entwicklung des Prinzips der Irreversibilität eine sehr bedeutende und interessante Rolle. Ausgangspunkt des Prinzips in der Physik des 19. Jahrhunderts war jedoch die Dampfmaschine. Begriffe wie Wärmereservoir, Kondensator, Ausdehnungsarbeit der Gase, Prozesse wie ein sich im Zylinder bewegender Kolben konnten vor der Ausnutzung des Dampfes nicht in die Physik eingehen. Daraus folgt aber nicht, daß Carnot, Clausius und W. Thomson durch das unmittelbare Studium der Dampfmaschine zur Idee der Irreversibilität gelangt snd. Iin der Geschichte der Wissenschaft stimmt die „phylogenetische" Entwicklung eines Prinzips nicht immer mit den „ontogenetischen" Interessen und Ideen der Wissenschaftler überein. Letztere brauchen durchaus nicht mit den historischen Ausgangspunkten identisch zu sein. Als die „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers ..." erschienen, wurden die Grundbegriffe der Dampfmaschinentechnik gerade allgemein bekannt. Aber das Interesse an den Arbeitsprinzipien der Dampfmaschine wurde zum Teil in ein Interesse an darin enthaltenen rein physikalischen Beziehungen transformiert. Es gab außerdem unter den Zeitgenossen Carnots auch Wissenschaftler, in deren Arbeiten die historisch mit der Dampfmaschine verbundenen Probleme rein mathematische Formen annahmen. Es sei in diesem Zusammenhange nur auf Joseph Fourier verwiesen.

Der Übergang zu immer abstrakteren Begriffen fiel logisch und historisch mit dem Übergang zu immer konkreteren Vorstellungen von der Mechanik der Moleküle, mit der Konkretisierung und Modifikation der mechanischen Modelle einer kinetischen Gastheorie zusammen. In diesem Bereich wird besonders klar sichtbar, wie sich äußerst allgemein und abstrakt erscheinende Beziehungen als Teilbereiche noch allgemeinerer Zusammenhänge erweisen, die bei genauerer Untersuchung der konkreten Einzelheiten gefunden wurden. Es zeigt sich die Bedingtheit einer Gegenüberstellung von abstrakten und konkreten Begriffen in der Wissenschaft. Schließlich führten Konkretisierung und Verallgemeinerung (zwei Seiten ein und derselben Tendenz) thermodynamischer und kinetischer Vorstellungen zur Herausbildung der statistischen Mechanik.

[11] R. Clausius, Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, a. a. O.

Clausius verallgemeinerte das Carnotsche Prinzip, indem er auf die Bedingung der Irreversibilität verwies. „*Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.* Die hierin vorkommenden Worte ‚von selbst', welche der Kürze wegen angewandt sind, bedürfen, um vollkommen verständlich zu sein, noch einer Erläuterung, welche ich in meinen Abhandlungen an verschiedenen Orten gegeben habe. Zunächst soll darin ausgedrückt sein, daß durch Leitung und Strahlung die Wärme sich nie in den wärmeren Körpern auf Kosten des kälteren noch mehr anhäufen kann. Dabei soll dasjenige, was in dieser Beziehung über die Strahlung schon früher bekannt war, auch auf solche Fälle ausgedehnt werden, wo durch Brechung oder Reflexion die Richtung der Strahlen irgendwie geändert und dadurch eine Konzentration derselben bewirkt wird. Ferner soll der Satz sich auch auf solche Prozesse beziehen, die aus mehreren verschiedenen Vorgängen zusammengesetzt sind, wie z. B. Kreisprozesse der oben beschriebenen Art. Durch einen solchen Prozeß kann allerdings (wie wir es bei der umgekehrten Ausführung des obigen Kreisprozesses gesehen haben) Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übertragen werden; unser Satz soll aber ausdrücken, daß gleichzeitig mit diesem Wärmeübergang aus dem kälteren in den wärmeren Körper entweder ein entgegengesetzter Wärmeübergang aus einem wärmeren in einen kälteren Körper stattfinden oder irgend eine sonstige Veränderung eintreten muß, welche die Eigentümlichkeit hat, daß sie nicht rückgängig werden kann, ohne ihrerseits, sei es unmittelbar oder mittelbar, einen solchen entgegengesetzten Wärmeübergang zu veranlassen. Dieser gleichzeitig stattfindende entgegengesetzte Wärmeübergang oder die sonstige Veränderung, welche einen entgegengesetzten Wärmeübergang zur Folge hat, ist dann als *Kompensation* jenes Wärmeüberganges von dem kälteren zum wärmeren Körper zu betrachten, und unter Anwendung dieses Begriffes kann man die Worte ‚von selbst' durch die Worte ‚ohne Kompensation' ersetzen, und den obigen Satz so aussprechen: *Ein Wärmeübergang aus einem kälteren in einen wärmeren Körper kann nicht ohne Kompensation stattfinden.*"[12]

Der Begriff der Kompensation zwingt Clausius, in seinen Betrachtungen von der Kraftmaschine zum Kosmos überzugehen. Dieser Übergang ist bereits im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik vorgegeben. Die Irreversibilität des Wärmeüberganges verlangt die Einschränkung: ohne Kompensation, d. h. ohne einen anderen Prozeß, der mit dem Übergang der Wärme auf einen kälteren Körper verbunden ist. Damit geht die Irreversibilität von einem Prozeß auf einen anderen über. Sie erfaßt das Weltall und gibt der Richtung der Zeit im Weltall einen physikalischen Sinn.

Bei Clausius bedeutet Anwachsen der Entropie gerichtete Zeit. Die alte Bewegungsauffassung, die keine irreversiblen Prozesse kannte, verneint ihrem Wesen nach die Veränderlichkeit der Welt. Sogar die Umwandlung der Energie ohne anwachsende Entropie würde ständige Wiederholung ein und desselben Kreises von Umwandlungen bedeuten. Clausius kommt sehr nahe an eine Unterscheidung von Bewegung als Wiederholung und Bewegung als irreversiblem Prozeß heran.

[12] Ebenda, Bd. 1, 2. Aufl. Braunschweig 1876, S. 81–82.

Ein Jahr nachdem Clausius den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik abgeleitet hatte, gab W. Thomson diesem eine etwas andere Form.[13] Für Thomson war das Prinzip der Irreversibilität ein Postulat, das keine Maschine zuläßt, die ein bestimmtes Wärmereservoir zur Gewinnung von Arbeit ausnutzt, ohne daß ein anderes Resevoir mit einer vom ersteren verschiedenen Temperatur vorhanden ist. Eine solche Maschine könnte den unbegrenzten Energievorrat ausnutzen, der sich in ihrer Umgebung befindet, könnte unbegrenzt Arbeit leisten, ohne dem Energieprinzip zu widersprechen. Später nannte Ostwald eine solche Maschine ein perpetuum mobile *zweiter Art*. War die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile erster Art (d. h. die Gewinnung von Arbeit ohne ein entsprechendes Äquivalent verbrauchter Energie) eine der ersten Formen des Energieprinzips, so war die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile zweiter Art (die Gewinnung von Arbeit aus nur einem Wärmereservoir) die anfängliche Form des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.

W. Thomson erweiterte den Wirkungsbereich der Entropie auf das gesamte unendliche Weltall. Er ignorierte die nur bedingte Berechtigung, physikalische Beziehungen, die sich aus der Verallgemeinerung der klassischen Theorien des 19. Jahrhunderts ergaben, in das Unendliche zu extrapolieren. Das Verhalten eines Systems mit einer geringen Zahl von Freiheitsgraden unterliegt nicht dem Prinzip des irreversiblen Anwachsens der Entropie. Das Verhalten eines Systems mit einer statistisch großen Zahl von Freiheitsgraden wird dagegen unter bestimmten Bedingungen von ihm bestimmt. Verringert sich die Entropie, so muß in jedem Falle nach einem anderen kompensierenden Prozeß gesucht werden, der dem Prinzip der Irreversibilität unterworfen ist. Kann man aber das Gesetz der anwachsenden Entropie auf das unendliche Weltall ausdehnen? Thomson sprach von einer Umwandlung der Weltenergie in Wärme, die bei allen physikalischen Prozessen freigesetzt wird. Daraus folgt ein zukünftiger Wärmetod. Die Temperaturunterschiede verschwinden, und die gesamte Energie der Welt verwandelt sich in Wärme, die gleichmäßig im Weltall verteilt ist. Den Übergang zu einem solchen Zustand nennt Thomson Zerstreuung der Energie.

Die Vorstellung eines Wärmetodes ist eine unzulässige Schlußfolgerung aus dem Prinzip der Irreversibilität. Sie macht den ersten Hauptsatz der Wärmelehre zu einer rein formalen und negativen Aussage. Hierüber schreibt Engels in einem seiner Fragmente zur „Dialektik der Natur".[14] Die Annahme eines Wärmetodes kann man rein logisch mit dem Hinweis widerlegen, daß man für endliche Bereiche gültige Beziehungen nicht auf das unendliche Weltall anwenden kann. Bedeutend schwieriger ist es allerdings, diejenigen physikalischen Prozesse zu finden, die die Zerstreuung der Energie auf einen mehr oder minder bestimmten Bereich begrenzen.

[13] Vgl. W. Thomson, Über die dynamische Theorie der Wärme, Leipzig/Berlin 1914, S. 6–19.
[14] F. Engels, Dialektik der Natur, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, Berlin 1962, S. 324–327, 544–545.

3. Die thermodynamischen Ideen James Clerk Maxwells

Die Anwendung statistischer Begriffe auf Theorien der Wärme und der Gase finden wir auch in einigen Arbeiten Maxwells aus den sechziger Jahren.

Maxwells Theorie der Gase ist als Übergang zur bedingten Anwendung mechanischer Modelle in der Physik und zum Verständnis statistischer Gesetzmäßigkeiten historisch interessant.

In den entsprechenden Arbeiten verwendete Maxwell vielfach physikalische Analogien und anschauliche Modelle. Diese Analogien und Modelle unterscheiden sich allerdings wesentlich von den in den Maxwellschen Arbeiten zur Elektrodynamik verwendeten.

Im Jahre 1850 betrachtete Maxwell die Moleküle noch als elastische Körper. In einer zweiten, 1866 veröffentlichten Arbeit[15] hält er es für möglich, die endliche Ausdehnung der Moleküle in seinen Berechnungen zu vernachlässigen und mit Zentren zu arbeiten, die sich umgekehrt proportional der fünften Potenz des Abstandes abstoßen. In einer makroskopischen Theorie spielen diese sehr kleinen elastischen Körper die Rolle einer erläuternden Illustration. Maxwell glaubt, daß man ohne eine solche Illustration auskommen kann, daß sie durch das Bild sich gegenseitig abstoßender punktförmiger Zentren ersetzbar ist.

Maxwells Gastheorie schließt sich unmittelbar an die Arbeiten von Clausius an. In einer Vorlesung, die Maxwell 1875 vor der Chemical Society in London hielt[16], weist er darauf hin, daß Clausius einen neuen Bereich der mathematischen Physik geschaffen hat. Er ist dabei zu physikalischen Verallgemeinerungen gelangt, die es erlauben, mathematische Methoden zum Studium von Systemen anzuwenden, die aus einer unendlichen Menge sich bewegender Moleküle bestehen. Darin liegt vor allem sein grundsätzliches Verdienst. Clausius teilte die Moleküle entsprechend ihren Geschwindigkeiten in Gruppen ein. Da es ihm nicht möglich war, das Verhalten der einzelnen Moleküle zu untersuchen, berücksichtigte er die sich ändernde Zahl der Moleküle in den verschiedenen Geschwindigkeitsintervallen. Diese Methode ist nach Maxwell die sowohl experimentell als auch mathematisch einzig mögliche. Sie führt von den streng dynamischen zu statistischen und relativistischen Theorien.

In seinen Arbeiten zur kinetischen Theorie der Gase sowie in einigen Übersichtsartikeln und Referaten hob Maxwell immer wieder die Irreversibilität molekularer Prozesse hervor. In seinem Vortrag „Über die Beziehungen zwischen Mathematik und Physik"[17] betonte er, daß die Erkenntnisse über irreversible Prozesse zu den wertvollsten Ergebnissen gehören, die das Studium der Moleküle erbracht hat.

[15] J. C. Maxwell, On the dynamical theory of gases, in: The scientific papers, Bd. 2, New York 1890.

[16] J. C. Maxwell, On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies, in: Ebenda.

[17] Vgl. J. C. Maxwell, Address to the mathematical and physical section of the British Association, in: Ebenda.

Maxwell interessierten besonders die Beziehungen zwischen den makroskopischen Begriffen und Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik einerseits und den mikroskopischen Modellen andererseits. In seiner makroskopischen Theorie waren die Moleküle für Maxwell nur Hilfsmodelle. Als er aber zu mikroskopischen Prozessen überging, die letztlich die makroskopischen Erscheinungen bestimmen, vertrat er die physikalische Realität der Moleküle und ihrer den Gesetzen der klassischen Mechanik untergeordneten Bewegungen.

In der makroskopischen Theorie operierte Maxwell mit Mittelwerten und statistischen Gesetzmäßigkeiten und erkannte, daß dieser Kreis makroskopischer Begriffe und Gesetzmäßigkeiten, der den Zustand der unendlichen Vielzahl von Molekülen bestimmt, sich von den Begriffen der Mechanik unterscheidet und nur durch neue mathematische Begriffe und Methoden erfaßt werden kann. Hiermit erreichte Maxwell die Grenze der mechanischen Naturbetrachtung. Aber hinter den statistischen Gesetzmäßigkeiten der makroskopischen Theorie steht bei ihm die Mechanik der Moleküle. Somit erlangen nur die makroskopischen Begriffe einen nichtmechanischen Inhalt. Man braucht aber nur zu einem anderen Maßstab überzugehen, und die Positionen der Mechanik sind wiederhergestellt: einfache umkehrbare Prozesse, mechanische Zusammenstöße sich bewegender Moleküle. Als Brücke zwischen den makroskopischen Begriffen der Gastheorie und der Mechanik Newtons dienten Maxwell die Analogien. Für die Mikroprozesse waren die mechanischen Modelle allerdings nicht nur Analogie. Hier waren Wärmeprozesse und mechanische Erscheinungen ihrer Natur nach identisch. In seinem Aufsatz „Über Faradays Kraftlinien“ äußerte sich Maxwell über die Anwendung der Analogiemethode auf die Theorie der Elektrizität. Er verwies dabei auf die Analogie zwischen den nicht auf die Mechanik zurückführbaren makroskopischen Gesetzen der Thermodynamik und der Newtonschen Gravitationstheorie als klassisches Beispiel.

„Die Gesetze der Wärmeleitung in homogenen Medien erscheinen auf den ersten Anblick in physikalischer Hinsicht denkbarst verschieden von denen der Anziehung. Die Größen, welche bei dem zweiten Problem vorkommen, sind: Temperatur, Wärmefluß, Leitungsfähigkeit. Das Wort Kraft ist dem Gegenstand fremd; trotzdem finden wir, daß die mathematischen Gesetze der stationären Bewegung der Wärme in homogenen Mitteln der Form nach identisch sind mit denen einer Anziehung, welche dem Quadrat der Entfernung verkehrt proportional ist. Wenn wir Wärmequellen statt Anziehungszentrum, Wärmefluß statt beschleunigende Kraft der Anziehung und Temperatur statt Potential setzen, so verwandeln wir die Lösung eines jeden Problems der Anziehungslehre in die eines Problems der Lehre der Wärmeleitung.“[18]

In der makroskopischen Thermodynamik mußten somit bereits nichtmechanische, physikalische Begriffe verwendet werden. In der Elektrizitätslehre erhielten die Analogien einen neuen Sinn. Hier konnten die nichtmechanischen makroskopischen Begriffe nicht mehr auf Elementarprozesse zurückgeführt werden, die ihrer Natur nach mechanisch waren.

[18] J. C. Maxwell, Über Faradays Kraftlinien, Leipzig 1895, S. 5–6.

4. Die Theorie Ludwig Boltzmanns

Ungeachtet der Tiefe und Originalität der statistischen Konzeption Maxwells ist Boltzmann der eigentliche Begründer der statistischen Physik. Ausgangspunkt dafür ist sein H-Theorem, mit dem eine statistische Interpretation des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre gegeben wird. Dieses Theorem wurde 1872 veröffentlicht.[19] Boltzmann führte die Funktion H als mittleren Logarithmus der Verteilungsfunktion ein. Außerdem suchte er diejenige Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten, die allein den Bedingungen des statistischen Gleichgewichts entspricht. Die Funktion H (mit negativem Zeichen) ist der Entropie analog. Sie mißt die Wahrscheinlichkeit einer gegebenen Verteilung der Moleküle. Diejenige Verteilung, die der Forderung des statistischen Gleichgewichts entspricht, besitzt die größte Wahrscheinlichkeit. Im Zustande des Gleichgewichts vergrößert sich die Entropie nicht.

1886 gab Boltzmann vor der Wiener Akademie der Wissenschaften eine allgemeine Charakteristik der statistischen Gesetzmäßgkeiten.[20] Er stellte die Frage, weshalb die Existenz der einzelnen Moleküle, die sich unabhängig voneinander bewegen, nicht zu solchen makroskopischen Effekten führt wie beispielsweise zur Erwärmung des einen Endes eines horizontal gelagerten Metallstabes als Ergebnis zufälliger Geschwindigkeitsänderungen der sich bewegenden Moleküle, wobei sich die Moleküle mit großen Geschwindigkeiten an jenem Stabende konzentrieren. Ein solcher Effekt ist ebenso wenig zu beobachten wie eine unerwartete Erhöhung der Dichte eines Gases durch die Bewegung vieler Moleküle zu einem Punkte. Boltzmann stützt sich auf die Beispiele statistischer Gesetzmäßigkeiten, die aus der Entwicklung der demographischen und sozialen Statistik bekannt geworden waren. Solange sich die äußeren Bedingungen nicht wesentlich ändern, bleibt die Zahl der sogenannten freiwilligen Vergehen, z. B. Selbstmorde, die Zahl der zufälligen Vergehen (z. B. die Zahl der Briefe, die ohne Adresse in den Briefkasten geworfen werden), die Zahl der Geburten, der Todes- und Krankheitsfälle für die große Masse der Bevölkerung unverändert. „Nicht anders geht es bei den Molekülen."[21] Diese Assoziation deckt nicht nur die Wurzeln der statistischen Vorstellungen bei Boltzmann auf, die „Ontogenese" der statistischen Physik im schöpferischen Prozeß des Wissenschaftlers, sondern auch die wirkliche historische Beziehung zwischen der demographischen Statistik und der statistischen Physik, ihre „Phylogenese". Die demographischen Statistiken beeinflußten die Gedankengänge des Wissenschaftlers in ähnlicher Art wie die mathematischen Theorien der Wahrscheinlichkeit die Entwicklung des mathematischen Apparates der Thermodynamik.

Boltzmann spricht davon, daß der Gasdruck auf einen Kolben durch die Summe der Moleküle hervorgebracht wird, die unter verschiedenem Winkel und mit

[19] L. Boltzmann, Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen, in: Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 1, Leipzig 1909, S. 316–402.

[20] L. Boltzmann, Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, in: Populäre Schriften, Leipzig 1905, S. 25–50.

[21] Ebenda, S. 34.

unterschiedlicher Kraft auftreffen. Bei einer großen Zahl von Molekülen wirkt jedoch auf jede Teilfläche des Kolbens im Mittel ein und dieselbe Intensität der Molekülstöße. Deshalb muß der Wissenschaftler für einen anwachsenden Gasdruck eine äußere Ursache suchen, die das statistische Gleichgewicht stört und die Moleküle zwingt, einen bestimmten Oberflächenabschnitt allen anderen vorzuziehen.

Aus der Annahme statistischer Gesetzmäßigkeiten schließt Boltzmann unmittelbar auf die Irreversibilität molekularer Prozesse. Die Energie geht aus einer weniger wahrscheinlichen Form in die wahrscheinlichere über.

Bei einer völlig ungeordneten Molekülbewegung ist nicht anzunehmen, daß sich die Geschwindigkeit der Moleküle in einem Teil des Körpers im Mittel von denen in einem anderen Teil unterscheiden wird. Wenn aber aus irgendeinem Grunde doch ein solcher Zustand eintritt, wird er bald durch eine wahrscheinlichere und gleichmäßigere Verteilung der Temperatur abgelöst. Aus diesem Grunde geht die Wärme auch von einem wärmeren auf einen kälteren Körper über. Die Wahrscheinlichkeit dieses Endzustandes des Systems ist größer als die des Anfangszustandes. Die Entropie des irreversiblen Prozesses wächst.

1886 legte Boltzmann in dem bereits angeführten Vortrag über den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik seine Überlegungen dar. Grundlage war die These von der eindeutig bestimmten Richtung aller energetischen Transformationen. Energie kann sich nicht beliebig aus einer Form in eine andere umwandeln. Sie geht von einer weniger wahrscheinlichen Form in eine mit größerer Wahrscheinlichkeit über. Wenn die anfängliche Energieverteilung nicht der größten Wahrscheinlichkeit entspricht, so wird sich die Energie im weiteren Prozeßverlauf so umverteilen, daß ihre Verteilung in jedem gegebenen Moment einer größeren Wahrscheinlichkeit entspricht als im vorangegangenen. Die Energiearten, die in der Produktion ausgenutzt werden, haben meist eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit. Boltzmann nennt das Beispiel der mechanischen Verschiebung von Körpern. Damit sich der Körper bewegt, ist eine völlig übereinstimmende Ortsveränderung aller seiner Moleküle erforderlich. Wenn es gelänge, völlige Übereinstimmung in der Bewegung der Moleküle zu erreichen, so könnte die Energie vollständig in eine andere Form übergehen. Nach dem Energieprinzip ist die übereinstimmende Bewegung der Moleküle eine höhere Form der Energie. Das ist aber nur ein Synonym für die geringste Wahrscheinlichkeit. Bei jeglicher Energietransformation wird sich ein Teil der Moleküle dieser Übereinstimmung entziehen und zu einem wahrscheinlicheren Zustand übergehen, d. h. zur ungeordneten Bewegung. Bei jeder vorhandenen Temperaturdifferenz werden sich die Moleküle so bewegen, daß die weniger wahrscheinliche Verteilung in eine wahrscheinlichere übergeht. Eine Umformung der Energie setzt immer eine „unwahrscheinliche" Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten voraus. Bei Temperaturausgleich kann die Wärme in andere Energieformen umgewandelt werden. „Die Temperatur gleicht sich aus. Schlagen wir aber Umwege ein, so können wir die vorhandene Unwahrscheinlichkeit in der Verteilung der Energie benutzen, um auf ihre Kosten andere unwahrscheinliche Energieformen zu erzeugen, die sich nicht von selbst bilden würden. Wir können bei Gelegenheit des Wärmeübergangs von einem

heißeren zu einem kälteren Körper einen Teil der übergegangenen Wärme in sichtbare Bewegung oder in Arbeit verwandeln, was z. B. bei den Dampfmaschinen oder allen kalorischen Maschinen geschieht. Das gleiche wird jedesmal möglich sein, wenn die Energieverteilung zu Anfang nicht den Wahrscheinlichkeitsgesetzen entspricht, zum Beispiel wenn ein Körper kälter als seine Umgebung ist, wenn in einem Gas an einer Stelle die Moleküle dichter gedrängt, an einer anderen dünner gesäet sind usw."[22]

Den Wahrscheinlichkeitsgrad jeder Energieverteilung kann man mathematisch bestimmen. Die ihm entsprechende Größe ist die Entropie. Sie vergrößert sich bei allen selbständig verlaufenden energetischen Prozessen. In den Fällen, in denen sich die Entropie verringert, vergrößert sich dementsprechend die Entropie anderer Körper. „Dementsprechend" heißt hierbei in demselben Maße oder stärker. Allgemeine Grundlage einer jeden Energieumwandlung ist somit ein gewisser Vorrat an „Unwahrscheinlichkeit". Für das Sonnensystem besteht er in der Temperaturdifferenz zwischen der Sonne und den Planeten. Es ist nicht möglich, die Energie praktisch in ihrem Gleichgewichtszustand, in ihrer wahrscheinlichsten Verteilung auszunutzen. In allen uns umgebenden Körpern ist eine gewaltige Wärmemenge enthalten, aber wir können sie nicht nutzen, weil sie gleichmäßig verteilt ist. Zwischen Sonne und Erde dagegen besteht ein riesiges Temperaturgefälle.

„Der in dem Streben nach größerer Wahrscheinlichkeit begründete Temperaturausgleich zwischen beiden Körpern dauert wegen ihrer enormen Entfernung und Größe Jahrmillionen. Die Zwischenformen, welche die Sonnenenergie annimmt, bis sie zur Erdtemperatur herabsinkt, können ziemlich unwahrscheinliche Energieformen sein, wir können den Wärmeübergang von der Sonne zur Erde leicht zu Arbeitsleistungen benützen, wie den vom Wasser des Dampfkessels zum Kühlwasser. Der allgemeine Daseinskampf der Lebewesen ist daher nicht ein Kampf um die Grundstoffe — die Grundstoffe aller Organismen sind in Luft, Wasser und Erdboden im Überflusse vorhanden —, auch nicht nur Energie, welche in Form von Wärme leider unverwandelbar in jedem Körper reichlich enthalten ist, sondern ein Kampf um die Entropie, welche durch den Übergang der Energie von der heißen Sonne zur kalten Erde disponibel wird. Diesen Übergang möglichst auszunutzen, breiten die Pflanzen die unermeßliche Fläche ihrer Blätter aus und zwingen die Sonnenenergie in noch unerforschter Weise, ehe sie auf das Temperaturniveau der Erdoberfläche herabsinkt, chemische Synthesen auszuführen, von denen man in unseren Laboratorien noch keine Ahnung hat. Die Produkte dieser chemischen Küche bilden das Kampfobjekt für die Tierwelt."[23]

Charakteristisch für Boltzmann ist die enge Verbindung von rein physikalischen und philosophischen Betrachtungen über die statistischen Gesetzmäßigkeiten und die Irreversibilität mit ihrem quantitativ-mathematischen Begriffsapparat, der das Maß der Wahrscheinlichkeit eines Zustandes des statistischen Ensembles ausdrückt.

[22] Ebenda, S. 35–36.
[23] Ebenda, S. 39–40.

1906 veröffentlichte Max Planck in seiner Vorlesung über die Wärmestrahlung die Formel, die die grundlegende Idee Boltzmanns ausdrückt, die Interpretation der Entropie als Logarithmus der Wahrscheinlichkeit des Systemzustandes.[24] Diese Formel

$$S = k \ln W$$

wurde in den Grabstein Boltzmanns eingemeißelt. Boltzmann sprach allerdings nur von einer Proportionalität zwischen der Entropie und dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit des Zustandes. (Die universelle Integrationskonstante k wurde von Planck eingeführt.) Diese Proportionalität wurde von Einstein als *Boltzmannsches Prinzip* bezeichnet.

Die Vorstellungen über die Entropie und die statistische Natur des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik bildeten sich im Verlaufe lebhafter Diskussionen immer klarer heraus. An ihnen beteiligten sich vor allem Loschmidt, Poincaré, Zermelo sowie weitere Physiker und Mathematiker.

1876 wies Josef Loschmidt auf die Unmöglichkeit hin, den Gleichgewichtszustand eines statistischen Ensembles von Molekülen beliebig lange aufrechtzuerhalten.[25] Stellen wir uns vor, schrieb Loschmidt, daß die Geschwindigkeitsverteilung etwa der Maxwellschen entspricht, d. h. der wahrscheinlichsten Verteilung, und alle Geschwindigkeiten das Vorzeichen ändern. In diesem Falle würde das Ensemble den vorhergehenden Zustand wieder erreichen, lediglich in umgekehrter Ordnung. Das System durchläuft aber unbedingt einen Zustand, der sich nur durch das Zeichen der Geschwindigkeit von jenem unterscheidet, der vor der Herstellung des Gleichgewichts geherrscht hat. Das System kehrt somit zu einem weniger wahrscheinlichen Zustand, zu einem Zustand mit geringerer Entropie zurück. Boltzmann entgegnete Loschmidt, daß Abweichungen vom Zustand des Gleichgewichts mit Veränderungen abwechseln, die das System zum Gleichgewichtszustand hinführen.

Die Bemerkungen von Henri Poincaré[26] und Ferdinand Zermelo[27] bezogen sich vor allem auf die Konstatierung, daß ein statistisches Ensemble unbedingt zu einem bereits durchlaufenen Zustand zurückkehren müsse. Poincaré zeigte, daß sich ein bewegendes System, dessen verallgemeinerte Koordinaten und Impulse in bestimmten endlichen Grenzen liegen, dem Anfangszustand beliebig nähern kann. Zermelo leitet daraus ab, daß eine abgeschlossene endliche Vielzahl von Gasmolekülen nicht zu einem Gleichgewichtszustand gelangt, sondern sich nach

[24] Vgl. M. Planck, Theorie der Wärmestrahlung, Leipzig 1966, S. 118.

[25] J. Loschmidt, Der Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft, in: Sitzungsberichte der mathem.-naturw. Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien, Bd. 73, 75, 76, 1876–1878.

[26] J. H. Poincaré, Tentatives d'explicat. mecan. des principes de la thermodynamic, in: Comtes rendus, 108, 1889, S. 550.

[27] E. F. F. Zermelo, Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie, in: Ann. Phys. 57, 1896, S. 485; E. F. F. Zermelo, Über mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge, in: Ann. Phys. 59, 1896, S. 793.

einer genügend langen Zeit in einen Zustand mit minimaler Entropie verwandelt. Zum Beispiel wird ein Gemisch zweier Gase im Laufe der Zeit einen Zustand erreichen, bei dem sich die Moleküle eines Gases in einem Teil des Gefäßes konzentrieren, die Moleküle des zweiten Gases dagegen in dem anderen.

Boltzmann erwiderte darauf, daß die Gase für eine Rückkehr in diesen Zustand eine so lange Zeit benötigen, daß diese Möglichkeit praktisch vernachlässigt werden kann. Die Wahrscheinlichkeit der Trennung zweier diffundierter Gase ist so gering, daß sie in real übersehbaren Zeitabständen praktisch nicht beobachtet werden kann. Genausowenig wahrscheinlich ist es, daß alle Häuser einer Stadt zufällig gleichzeitig abbrennen werden.

Somit ergibt sich der Übergang von einem weniger wahrscheinlichen Zustand zu einem Zustand mit größerer Wahrscheinlichkeit selbst nur als wahrscheinlich. Er schließt den entgegenlaufenden Prozeß nicht aus. Diese Konzeption wurde in den Jahren von 1905 bis 1913 in den Arbeiten von Albert Einstein[28] und Marian Smoluchowski bestätigt.[29] Die in einer Flüssigkeit schwebenden sogenannten Brownschen Teilchen bewegen sich makroskopisch als Resultat „unwahrscheinlicher“ Fluktuationen. Die Beobachtungsergebnisse dieser Bewegungen entsprechen den Resultaten, die Einstein und Smoluchowski auf der Grundlage der statistischen Konzeption Boltzmanns theoretisch errechneten. Boltzmann wendete den Begriff der Fluktuation auch auf das Weltall an, das als abgeschlossenes System betrachtet wird. Wenn im Weltall statistische Gesetze gelten, so muß dem Prozeß, der mit einer Vergrößerung der Entropie verbunden ist, ein Prozeß entsprechen, der eine Verringerung der Entropie zur Folge hat. Beide Prozesse weichen vom Gleichgewicht ab. Insgesamt aber muß sich das Weltall im Gleichgewicht befinden. Eine solche Annahme widerspricht jedoch einer Vielzahl von experimentellen Daten. Das uns umgebende Weltall, soweit wir es erfassen können, entwickelt sich in einer Richtung, geht von einem weniger wahrscheinlichen Zustand zu einem wahrscheinlicheren über, und die anwachsende Entropie wird durchaus nicht von Prozessen mit abnehmender Entropie begleitet.

Daraus folgt, daß das Weltbild entweder nicht der Statistik unterworfen oder nicht abgeschlossen ist und sich deshalb nicht in einem Gleichgewicht befindet, in dem sich die Entropie durch Fluktuation nach beiden Seiten verändern kann.

Aber vielleicht ist das Weltall, das unseren Beobachtungen zugängig ist, nur ein Teil des Weltalls, in dem das Gleichgewicht durch eine gewaltige Fluktuation gestört ist? Gerade so faßt Boltzmann die Prozesse in dem uns zugänglichen Teil des Weltalls in der uns bekannten Periode auf. Früher vergrößerte sich die Fluktuation, d. h., alle Prozesse wurden von einer Verringerung der Entropie begleitet. Die Temperatur ging von den kälteren zu den wärmeren Körpern über. Die Sterne strahlten keine Energie aus, sondern absorbierten sie. Gegenwärtig erleben wir die Liquidation dieser kosmischen Störung.

[28] A. Einstein, Elementare Theorie der Brownschen Bewegung, in: Zeitschr. für Elektrochemie, Bd. 14, 1908, S. 235–239.

[29] M. Smoluchowski, Einige Beispiele Brownscher Molekularbewegung unter Einfluß äußerer Kräfte, in: Abhandlungen über die Brownsche Bewegung und verwandte Erscheinungen, Leipzig 1923.

Verglichen mit dem unendlichen Weltall, ist unsere Galaxis nur ein verschwindend kleiner Bereich, in dem ein wenig wahrscheinlicher Übergang von einem Zustand größerer Wahrscheinlichkeit zu einem wenig wahrscheinlichen durchaus vor sich gehen könnte. Wenn die Wahrscheinlichkeit eines gegebenen Zustandes gleich 10^{-50} ist, so bedeutet das, daß sich die gegebene Kombination mit großer Wahrscheinlichkeit verwirklichen wird, wenn die allgemeine Zahl der Kombinationen 10^{50} übersteigt.

Boltzmann wollte den Begriff des thermodynamischen Gleichgewichts *nach oben* begrenzen, d. h., er wollte nicht zulassen, daß dieser Begriff auf einen zu großen Bereich — das von uns wahrnehmbare Weltall — ausgedehnt wird. Die Begrenzung des Begriffes *nach unten* ist offensichtlich. Bei einigen wenigen Molekülen kann man nicht von einem Gleichgewichtszustand des Systems sprechen. In Systemen, die nur eine geringe Zahl von Freiheitsgraden aufweisen, kann das Gleichgewicht gestört werden. Boltzmann geht einen sehr einfachen Weg. Er betrachtet die Grenze der uns bekannten Welt als *untere* Grenze eines statistischen Ensembles höherer Ordnung, des unendlichen Weltalls. Für das gesamte Weltall gilt somit die irreversible Entwicklung nicht. Dieser Fortschritt in der Auffassung der Fluktuation ermöglichte es später, Beobachtungen der Fluktuation im mikroskopischen Bereich als Argumente für eine Fluktuationstheorie des Weltalls zu verwenden.

Die Verletzung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre in Systemen mit einer geringen Zahl von Freiheitsgraden ergibt sich direkt aus seiner statistischen Natur. Schon Maxwell schrieb, daß der zweite Hauptsatz nur dann gilt, wenn die einzelnen Moleküle nicht berücksichtigt werden. Der berühmte Maxwellsche Dämon, ein Wesen, das in der Lage ist, einzelne Moleküle zu sehen und auszusondern, kann das Gesetz der Entropie verletzen. Für endliche Bereiche einer unendlichen Welt kann zutreffen, was Maxwell seinem Dämon vorbehalten hat: Der irreversible Übergang zu einem Zustand mit größerer Wahrscheinlichkeit kann durch Fluktuation gestört werden.

Gehen wir nun zu jener höheren Form des Prinzips der Irreversibilität über, die es in den Arbeiten von Willard Gibbs im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts erhalten hat. In diesem Zusammenhang müssen vor allem seine Arbeiten „Methode der geometrischen Darstellung der thermodynamischen Eigenschaften von Stoffen" (1873)[30] und „Elementare Grundlagen der statistischen Mechanik, entwickelt besonders im Hinblick auf eine rationelle Begründung der Thermodynamik" (1902)[31] genannt werden.

Gibbs beeinflußte die Entwicklung der Physik sehr stark. Er verband gleich Boltzmann umkehrbare Prozesse — das Verhalten diskreter Teilchen — mit den thermodynamischen Zuständen makroskopischer Objekte. Er betrachtete letztere als statistische Ensembles und führte Begriffe und Beziehungen der Wahrscheinlichkeitstheorie in die Mechanik solcher Systeme ein. Beim Aufbau einer stati-

[30] J. W. Gibbs, Method of geometrical representation of the thermodynamic properties by means of surface, in: Ac. Trans., Connecticut 1873, Vol. II, Part 2, S. 382.

[31] J. W. Gibbs, Elementare Grundlagen der statistischen Mechanik, entwickelt besonders im Hinblick auf eine rationelle Begründung der Thermodynamik, Leipzig 1905.

stischen Mechanik und Thermodynamik verwendete Gibbs neue und außerordentlich effektive analytische und geometrische Methoden, die später eine neue physikalische Interpretation erfuhren und in die heutige Quantenmechanik eingingen.

Im Erbe, das die nichtklassische Physik von der klassischen übernahm, finden wir neben physikalischen Prinzipien auch mathematische Methoden, ohne die die neue Physik ihre jetzige Form nicht gefunden hätte. Die Gesetze der eigentlichen klassischen Physik, die Beziehungen zwischen ihren physikalischen Größen, die der klassischen Approximation entsprechen, sind unabhängig von ihrer mathematischen Form in der relativistischen und Quantenphysik von unterschiedlicher Bedeutung: Zum Teil sind sie durch das Korrespondenzprinzip mit den Beziehungen der klassischen Physik verknüpft, zum Teil bestimmen sie Objekte, deren Wechselwirkung es erlaubt, die klassischen Begriffe des Impulses und der Koordinaten auf die Quantenobjekte zu übertragen. Die klassischen physikalischen Beziehungen konnten aber nicht die einzige heuristische Richtlinie für die Umwälzung bilden, die unter dem Druck experimenteller Daten allgemeinere und exaktere Beziehungen an ihre Stelle gesetzt hatte.

Mathematische Begriffe haben oft in einem solchen heuristischen Sinne gewirkt. Sie haben sich auf dem Boden der klassischen Physik entwickelt und später eine allgemeinere Form erhalten. Es sei daran erinnert, daß Einstein durch die Tensorrechnung zu neuen physikalischen Hypothesen in der Gravitationstheorie angeregt wurde. Deshalb betrachten wir die klassische Physik als einen Bereich, in dem die Voraussetzungen für die nichtklassischen Theorien vorbereitet waren, und verfolgen mit besonderem Interesse die sich auf dem klassischen Boden neu herausbildenden mathematischen Begriffe.

Zu ihnen gehört der Phasenraum, der von Gibbs vielfach beim Ausbau der statistischen Mechanik und Thermodynamik verwendet wurde.

Die statistische Mechanik basiert auf grundlegend neuen Auffassungen vom Verhalten mechanischer Systeme. Die traditionelle Mechanik betrachtet den Zustand eines Systems im gegebenen Moment in Abhängigkeit vom Zustand desselben Systems in seinem Anfangsmoment. Die statistische Mechanik interessiert sich nicht für alle einzelnen Zustände des gegebenen Systems. Sie betrachtet ein Ensemble von Systemen und bemüht sich zu klären, wie die Verteilung der Systeme ist und wie sie sich mit der Zeit verändert.

Stellen wir uns eine große Zahl von Systemen vor, die in allen Eigenschaften, außer der Konfiguration und der Geschwindigkeit, miteinander übereinstimmen. Es kann sich zum Beispiel um eine Vielzahl von Systemen handeln, die aus gleichen Teilchen bestehen, sich jedoch nach der Lage und der Geschwindigkeit unterscheiden, die das System im gegebenen Moment besitzt. Wir nehmen an, daß die für diese Systeme möglichen Zustände miteinander austauschbar wären, sich also voneinander unendlich wenig unterscheiden und außerdem alle erdenklichen Kombinationen der Konfigurationen und der Geschwindigkeiten aufweisen.

Gibbs betrachtete die für die angenommenen Systeme möglichen Phasen als Punkte eines abstrakten mehrdimensionalen Raumes. Diese Vorstellung erweiterte und verstärkte nicht nur den mathematischen Apparat der Thermodynamik und der theoretischen Physik insgesamt, sondern gab auch den Anstoß

für andere abstrakte Konstruktionen in der Physik — so für die mathematische Bearbeitung der mehrdimensionalen Geometrie — und übte einen starken Einfluß auf den Charakter des wissenschaftlichen Denkens der folgenden Periode aus.

Im 20. Jahrhundert wurde die Theorie der Entropie durch ein neues fundamentales physikalisches Prinzip bereichert. Dann aber häuften sich die Versuche einer Axiomatisierung durch äußerst komplizierte abstrakt-mathematische Konstruktionen.

1906 formulierte Walter Nernst ein neues vom ersten und zweiten Hauptsatz unabhängiges Prinzip der Thermodynamik.[32] Man bezeichnete es auch als dritten Hauptsatz der Thermodynamik. Es führt einige absolute Größen in die Thermodynamik ein, so einen absoluten Wert der Entropie. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik verweist auf die Existenz und die Veränderungen der Entropie S, die durch das Differential dS bestimmt wird. Damit ist die Entropie bis auf die Integrationskonstante genau bestimmt. Das genügt, um Aufgaben zu lösen, die die Kenntnis des absoluten Wertes der Entropie erfordern.

Der von Nernst verfolgte Weg sei hier kurz skizziert. (Im Hinblick auf die folgenden Arbeiten von Planck ist hier eine etwas abweichende Darstellung gegeben.) Die Entropie eines Systems kann durch folgendes Integral dargestellt werden:

$$S = \int \frac{dQ}{T} + S_0,$$

wo Q die Wärmemenge ist, die das System im Verlaufe des betrachteten Prozesses erhielt oder abgab, T die absolute Temperatur, und S_0 die von der Temperatur unabhängige Integrationskonstante.

Aus Untersuchungen bei sehr niedrigen Temperaturen entnahm Nernst, daß sich die Entropie bei Temperaturen nahe dem Nullpunkt sehr geringfügig verändert. Nernst nahm an, daß die Entropie zu einem konstanten Wert S_0 strebt, wenn sich die Temperatur dem absoluten Nullpunkt nähert. Dieser Wert ist von den Parametern und dem Zustand des Systems unabhängig. Die Konstante S_0 kann als Nullwert der Entropie aufgefaßt werden. Diese Annahme von Nernst wurde bestätigt und vielfach angewendet. Aus dem dritten Hauptsatz der Thermodynamik wurden Schlußfolgerungen wie das Streben der Wärmekapazität gegen Null bei Annäherung der Temperatur an den absoluten Nullpunkt, die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes (bei der prinzipiellen Möglichkeit beliebiger Annäherung) und viele andere gewonnen.

[32] W. Nernst, Über die Berechnung chemischer Gleichgewichte aus thermischen Messungen, in: Nachrichten d. Kgl. Gesellsch. d. Wiss. Göttingen 1906, H. 1, S. 1–40.

VII. DIE NAHWIRKUNG

1. Michael Faraday und die Realität des Feldes

In der klassischen Thermodynamik existierte ein statistisch-kontinuierliches Medium, in welchem die Bewegung diskreter Teilchen ignoriert wurde, jedoch hinter den Kulissen der makroskopischen Szene erhalten blieb. Die stetige Verteilung von Mittelwertgrößen in der klassischen Thermodynamik war eine historisch notwendige Voraussetzung für die Vorstellung einer stetigen Verteilung von Veränderlichen eines realen Feldes, für die Vorstellungen, die die Elektrodynamik Michael Faradays und James Clerk Maxwells charakterisierten.

Vor Faraday und Maxwell gab es den Begriff eines realen Feldes nicht. Der elastische Äther war kein Feld, und das Kraftfeld, das in der Theorie der Gravitation, in der Elektrostatik und in der Magnetostatik existierte, wurde nicht als reales Medium angesehen. Der Begriff des realen Feldes wurde in der Physik des 18. und 19. Jahrhunderts auf zweierlei Art vorbereitet. Erstens stieß die mechanische Konzeption des Äthers auf Widersprüche. Das ebnete einer nichtmechanischen Vorstellung über das Medium als reales Kraftfeld den Weg. Zweitens führte die Entwicklung einer formalen Konzeption des Feldes zu solchen Vorstellungen. Diese zwei Linien trafen sich in den Arbeiten Maxwells. Schon Faraday hatte eine Konzeption entwickelt, die durchaus nicht formal war und bereits eine nichtmechanische Interpretation des Feldes im Keime enthielt. Sie war nicht mehr in die einander entgegenstehende cartesische Kinetik oder Newtonsche Dynamik einzuordnen. Die kinetischen Modelle des Äthers enthielten eine Verschiebung seiner Teilchen. Der Äther war, wie jeder andere Stoff, in Bewegung; seinen Elementen konnte man einen Geschwindigkeitsvektor zuschreiben. Bei Faraday wurde die Verschiebung des Äthers durch eine dynamische Deformation abgelöst. Er identifizierte darüber hinaus das Medium, das die Wechselwirkung der Ladungen überträgt, mit Kräften und gab letzteren dadurch einen neuen Sinn. Die Ladungen waren für Faraday nur zweitrangige Erscheinungen. Diese Vorstellung war nicht eindeutig aus den Experimenten abzuleiten, aber eng mit ihnen verbunden. Zum Teil verallgemeinerte sie diese stärker, als es die vorhandenen Ergebnisse zuließen, zum Teil nahm sie neue Versuche vorweg.

Faraday ging von der elektrostatischen Induktion aus. In einer Reihe von Versuchen zeigte er, daß die elektrostatische Induktion vom Zwischenmedium abhängt. Er ersetzte den Elektrolyten einer Batterie durch eine nichtleitende Flüssigkeit. Die in diese getauchten Metallplatten bildeten somit einen Kondensator von bestimmter Kapazität. Faraday wies nach, daß sich die Kapazität des

Kondensators mit dem Wechsel der nichtleitenden Flüssigkeit änderte. Dieses Ergebnis war nicht durch die Verschiebung geladener Flüssigkeitsteilchen zu erklären. Die Ladungen wirkten durch ein nichtleitendes Medium aufeinander ein, wobei nicht nur der Abstand, sondern auch die Art des Mediums die Intensität der Wechselwirkung beeinflußten. Folglich stand die Kapazität des Kondensators mit einer bestimmten Deformation in Beziehung. Diesen Begriff einer Deformation des Mediums legte Faraday seiner Lehre von der Elektrizität zugrunde. Die diskreten Ladungen sind untereinander durch eine elastische Deformation des kontinuierlichen Mediums verbunden. Sie dringen nicht in das Innere des Leiters ein, weil auf seiner Oberfläche das dielektrische Medium, der eigentliche Träger elektrischer Prozesse, endet.

Diese Theorie hätte der Idee der Nahwirkung kaum zum Siege verholfen, wenn Faraday nicht einen neuen Bereich elektrischer Erscheinungen entdeckt hätte. Wie schon gesagt wurde, kann das elektrostatische und magnetostatische Feld sowohl von der Position der Fernwirkung als auch der Nahwirkung her beschrieben werden, und zwar mit Hilfe ein und desselben mathematischen Apparates, nämlich von Differentialgleichungen, die keine Differentialquotienten nach der Zeit enthalten.

Das Prinzip der Fernwirkung wurde in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts zur Erklärung der elektrischen Erscheinungen systematisch angewendet. 1759 faßte F. U. Th. Aepinus die elektrische Anziehung und Abstoßung als Kraft auf, die entsprechend der Newtonschen Schwerkraft auf die Entfernung wirkt.[1] Mit dem Gesetz der Wechselwirkung elektrischer Ladungen begann die mathematische Bearbeitung der Elektrostatik. Dieses Gesetz wurde von Joseph Priestley und unabhängig von ihm von Henry Cavendish in den sechziger und siebziger Jahren des 18. Jahrhunderts entdeckt. Aber das Gesetz trägt den Namen Coulombs, der es durch unmittelbare Messungen bestätigte. Nach dem Coulombschen Gesetz ziehen sich zwei im Verhältnis zu ihrem Abstand kleine Körper gegenseitig an oder stoßen sich ab mit einer Kraft, die proportional dem Produkt ihrer Ladungen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihrer Entfernung ist. Dieses Gesetz wurde zum Ausgangspunkt der mathematischen Bearbeitung der Elektrostatik. Folgende Aufgabe war zu lösen: Gegeben ist ein System von Leitern, das eine bestimmte Elektrizitätsmenge führt. Es ist auszurechnen, wie sich die Ladung verteilt und welche Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen den Ladungen auftreten. Solche Aufgaben wurden mit Hilfe von Differentialgleichungen gelöst, die eine kontinuierliche Veränderung der Feldstärke von Punkt zu Punkt beschrieben. Die Größe, die die sich verändernde Feldstärke charakterisiert — das Potential —, wurde zum zentralen Begriff der Elektrostatik. Die Theorie des elektrischen Potentials basiert auf Differentialgleichungen und betrachtet unendlich kleine Veränderungen der Feldstärke von einem Punkt zu einem anderen, unmittelbar benachbarten. Wir unterstreichen noch einmal: Der kontinuierliche Charakter der für die Elektrostatik grundlegenden Größe bedeutet nicht, daß die Elektrostatik sich in eine Nahwirkungstheorie verwandelt hätte, daß in die

[1] T. Epinus, Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi, Petropoli 1759.

Elektrizitätslehre die Vorstellung einer Wirkung durch ein kontinuierliches physikalisches Medium einbezogen wurde. Ohne die Elemente, die eine Abhängigkeit von der Zeit aufweisen, können Differentialgleichungen auch der Fernwirkungstheorie als mathematischer Apparat dienen.

Faraday zeigte experimentell, daß sich die Kraft der Anziehung oder Abstoßung der Ladungen in Abhängigkeit vom Medium verändert. Im Vakuum ist sie am größten, in anderen Medien dagegen kleiner, wobei jedem Dielektrikum eine konstante Größe zukommt, die in das Coulombsche Gesetz eingehen muß. Diese Größe ist die Dielektrizitätskonstante ε. Je größer sie ist, um so geringer sind die Coulombschen Kräfte. Somit erhält das Gesetz der Wechselwirkung der Ladungen e_1, e_2 folgende Form:

$$F_e = \frac{1}{\varepsilon} \frac{e_1 e_2}{r^2_{12}}.$$

Für den Äther ist $\varepsilon = 1$, für andere Dielektrika ist $\varepsilon > 1$. Dem analog hängt auch die Anziehung und Abstoßung von Magnetpolen vom Medium ab. Das dazwischen liegende Medium wird durch die Permeabilität μ charakterisiert, und das Gesetz der Wechselwirkung der magnetischen Pole m_1, m_2 lautet:

$$F_e = \frac{1}{\mu} \frac{m_1 m_2}{r^2_{12}}.$$

Der Begriff der magnetischen Permeabilität wurde durch eine Vielzahl von Experimenten gewonnen. Faraday versuchte zu zeigen, daß die Magnetpole in gewissem Maße auf jedes Medium einwirken. Zu diesem Zweck hängte er verschiedene nichtmagnetische Stoffe unter die Pole kräftiger Magneten. Es gelang ihm schließlich zu beweisen, daß Magnete auf alle Körper einwirken, wobei einige sich senkrecht zur Achse des Magneten stellen. Solche Körper nannte Faraday diamagnetisch, die gewöhnlichen magnetischen Körper dagegen paramagnetisch.

Die Theorie des Magnetismus widersprach der Physik der Fernwirkung genausowenig wie die Faradaysche Theorie des elektrischen Feldes. Die eine wie die andere benutzte den Begriff des Mediums, das durch die Dielektrizitätskonstante im Falle des elektrischen Feldes und durch die Permeabilität beim magnetischen Feld charakterisiert wurde. Diese Wirkung durch das Medium zeigte keine Abhängigkeit von der Zeit.

Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion erschloß jedoch einen neuen Bereich von Wechselwirkungen. Faraday hatte lange nach der Möglichkeit gesucht, elektrische Ströme durch Magnetismus zu erregen. 1822 erschien in seinen Heften folgende Eintragung: Magnetismus in Elektrizität umwandeln. Neun Jahre experimenteller Arbeit führten schließlich am 29. August 1831 zur Entdeckung.

Aus dem Gesetz der elektromagnetischen Induktion, wie es Faraday formulierte, ergab sich, daß die induzierte elektrische Spannung von der zeitlichen

Veränderung des magnetischen Feldes abhängt. Es zeigte sich, daß die elektromotorische Kraft im Leiter jedesmal dann entsteht, wenn das magnetische Feld anwächst oder schwächer wird. Faraday kam somit zu der Schlußfolgerung, daß im Raume, der den Magneten umgibt, das physikalische Medium eine gewisse Deformation erfährt, sich aber in den ursprünglichen Zustand zurückverwandelt, wenn der Magnet verschwindet. Die Veränderung des Zustandes ruft jeweils eine elektromotorische Kraft hervor. Worin liegt nun das Wesen dieses besonderen Zustandes des Mediums, dessen Veränderung Induktionsströme hervorruft? Faraday nannte diesen Zustand elektrotonisch und widmete sich seiner experimentellen Erforschung. Als Resultat entstand sein Modell der Kraftlinien. Faraday vertrat entschieden die reale physikalische Existenz der Kraftlinien. Maxwell charakterisierte in der Einleitung seines „Lehrbuches der Elektrizität und des Magnetismus" den Standpunkt Faradays mit folgenden Worten: „So sah ... Faraday in seinem geistigen Auge überall da Kraftlinien den Raum durchdringen, wo die Mathematiker in die Ferne wirkende Kraftzentren supponierten, und wo diese nichts als die Abstände zwischen den Kraftzentren bemerkten, war für Jenen ein Zwischenmedium vorhanden. Faraday suchte die Ursache der Erscheinungen in Aktionen, die im Zwischenmedium vor sich gehen sollten, die Mathematiker dagegen gaben sich damit zufrieden, daß sie sie in einer Fernwirkung auf die elektrischen Fluida entdeckten."[2]

Für die Forscher vor Faraday wurden Kräfte am ehesten als Substanz ohne Ausdehnung oder als bedingter Begriff angesehen. Für Faraday fiel der Begriff der Kraft mit dem der Kraftlinien zusammen, wobei der letztere durchaus kein geometrischer, sondern ein physikalischer Begriff war. Die Konzeption Faradays enthielt somit völlig neue Anschauungen über die Kräfte. Im Verlaufe der bisherigen Entwicklung der mechanischen Naturwissenschaft wurde die Kraft und auch die Richtung, in der sie wirkte, nicht als materielle ausgedehnte Substanz angesehen. Für Faraday war die Kraft Kraftlinie, die Kraftlinie aber war eine völlig reale physikalische Erscheinung. Hierin besteht das Leitprinzip der Ideen Faradays, das er auf die Schwerkraft, den Magnetismus, die Elektrizität, die Struktur der Materie und den Äther anwendete.

In einem Brief an Taylor legte Faraday seine grundlegenden Anschauungen über die Natur der Materie und des Äthers dar. Die Erscheinung der Leitfähigkeit erlaubte Faraday dabei nicht, den üblichen atomistischen Standpunkt einzunehmen. Ausgehend von der Annahme, daß der Körper aus stofflichen Atomen bestehe, die im leeren Raum verteilt sind, wird gefolgert, daß alle Körper Leiter sind, wenn der leere Raum den elektrischen Strom leitet, und Isolatoren, wenn das nicht der Fall ist.

„Daraus folgt, daß bei der Annahme der üblichen Atomtheorie der Raum in nichtleitenden Körpern als Nichtleiter, in leitenden Körpern dagegen als Leiter angenommen werden muß. Eine solche endgültige Schlußfolgerung führt jedoch zum völligen Zusammenbruch dieser Theorie. Ist der Raum nämlich ein Isolator,

[2] J. C. Maxwell, Lehrbuch der Electrizität und des Magnetismus, Bd. 1, Berlin 1883, S. VII.

so kann er nicht in Leitern existieren, ist er jedoch Leiter, so kann er sich nicht in nichtleitenden Körpern befinden."[3]

Deshalb kam Faraday zu einer Konzeption, zu der in der Geschichte der Wissenschaft kaum eine Analogie zu finden ist. Die Fakten, die den Physikern und Chemikern in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts als Beweis für die Atomstruktur der Stoffe dienten, waren Faraday gut bekannt. Aber für ihn war damit lediglich das Vorhandensein bestimmter Kraftzentren bewiesen. Damit näherte sich Faraday auf den ersten Blick hin der Konzeption von Boskovič. Er schrieb: „Wenn wir überhaupt Hypothesen aufstellen müssen — und wir können in einem Wissensgebiet wie diesem kaum ohne sie auskommen —, so sollten es möglichst wenige sein und in dieser Beziehung hat das Atom von Boskovič, wie mir scheint, einen großen Vorteil vor allen üblichen Vorstellungen. Wenn ich richtig verstehe, so sind seine Atome einfach Kraftzentren, aber keine materiellen Teilchen als Sitz dieser Kräfte. Wenn wir in der üblichen Art die Materieteilchen ohne ihre Wirkung mit a und das System der Kräfte oder der Wirkungen in ihnen und in ihrer Umgebung mit m bezeichnen, so verschwindet a nach der Theorie von Boskovič oder aber es existiert nur als mathematischer Punkt, nicht aber als unveränderliches undurchdringliches Stückchen Materie wie in den allgemein verbreiteten Vorstellungen, m dagegen ist die Kraftatmosphäre, die sich um ihn herum gruppiert."[4]

In atomistischen Konzeptionen, die Erscheinungen der Kristallographie, der Chemie und des Magnetismus erklären, ist die räumliche Ausdehnung der Atome unbedeutend. Nach Meinung Faradays tritt an die Stelle des räumlich ausgedehnten schweren Kerns, der vom leeren Raum umgeben ist, das punktförmige Zentrum, das sich im materiellen Medium befindet. Man darf nicht vergessen, daß die Kräfte, die sich in diesen punktförmigen Zentren konzentrieren, für Faraday durchaus keine abstrakten Begriffe sind, sondern reale, ausgedehnte, materielle Substanzen. In gewissem Sinne stülpt Faraday damit die dynamische Konzeption von Boskovič um. Er ist einverstanden, daß die Kräfte Eigenschaften des Atoms sind und daß lediglich die dynamische Charakteristik die Individualität des Atoms bestimmt. Aber jetzt erfolgt eine kühne und unerwartete Wendung der Gedanken. Die Materie löst sich nicht in Kräfte auf, wie das bei den Dynamikern der Fall war, sondern die Kräfte erhalten materiellen Charakter, und das leere Medium wird zum kontinuierlichen materiellen Medium, zur Gesamtheit der materiellen Substanzen — der Kräfte. Hierzu sei ein weiterer Ausschnitt des Briefes an Taylor angeführt:

„... wie wollen wir uns einen Kern ohne seine Kräfte vorstellen. Alle unsere Beobachtungen und unsere Kenntnisse über das Atom beschränken sich auf seine Kräfte: worauf soll man unsere Vorstellungen auf ein gewisses a stützen, wenn nicht auf die Kräfte. Dem Verstand, der sich gerade erst dieser Frage zugewendet hat, fällt es vielleicht etwas schwer, sich materielle Kräfte unabhängig von etwas

[3] Zit. nach: M. Фарадай, Размышления об электрической проводимости и о природе материи, in: Экспериментальные исследования по электричеству, т. 2, Москва 1951, S. 395.

[4] Ebenda, S. 399.

Einzelnem, was Materie genannt wird, vorzustellen. Aber viel schwieriger und überhaupt unmöglich ist es, sich diese Materie unabhängig von den Kräften vorzustellen. Die Kräfte sind uns bekannt. Wir erkennen sie in jeder Erscheinung des Weltalls, die bloße Materie dagegen nicht in einem einzigen Falle. Weshalb sollen wir deshalb die Existenz dessen annehmen, was wir nicht kennen, was wir uns nicht vorstellen können und wofür auch gar keine wissenschaftliche Notwendigkeit besteht?"[5]

Faraday ist gegen eine Materie, die aus der Welt der Kräfte und der Wirkungen ausgeschlossen ist. Diese Welt aber existiert nach seiner Meinung im Medium. Wenn man die Atome als die Zentren der Kräfte ansieht, „so existiert die Materie überall, es gibt keinen Zwischenraum, der nicht von ihr erfüllt ist"[6].

Faraday kehrt zu einem absolut erfüllten Raum zurück. Aber seine Konzeption ist durchaus nicht der von Descartes und auch keiner kinetischen im alten cartesischen Sinne ähnlich: Faraday führt die Kräfte nicht auf die Bewegung diskreter Teilchen der Materie zurück; für ihn ist das Kraftfeld die materielle Substanz, die den Raum erfüllt. Das ist weit entfernt von der Dynamik Boskovič', aber auch von der klassischen Atomistik. Die Idee Faradays ist durch die Materialität des Kraftfeldes charakterisiert. Das Atom stellt das Zentrum realer physikalischer Erscheinungen dar.

Wenn sich die Kraft vom gegebenen Zentrum aus gleichmäßig in alle Richtungen fortpflanzt, so bilden die Oberflächen gleicher Intensität der Kräfte eine Kugel. Wenn diese Kräfte bei der Ausbreitung in unterschiedliche Richtungen ungleichmäßig abnehmen, so erhalten die Oberflächen gleicher Intensität entsprechend der Form des Atoms vielleicht die Form eines Sphäroides oder eines beliebigen anderen geometrischen Körpers. Hieraus ergibt sich die gegenseitige Durchdringbarkeit der Materie. Die Grenzen jedes Atoms dehnen sich zumindest bis zur Grenze des Sonnensystems aus.

„Die hier geäußerten Ansichten über den Bau der Materie führen uns offensichtlich zu der Schlußfolgerung, daß die Materie den Raum soweit ausfüllt, wie sich die Gravitation ausbreitet (das Sonnensystem eingeschlossen), weil die Gravitation eine Eigenschaft der Materie ist, die von einer bestimmten Kraft abhängig ist, und eben aus dieser Kraft besteht die Materie. In diesem Sinne kann sich die Materie nicht nur gegenseitig durchdringen, sondern jedes Atom erstreckt sich auch über das ganze Sonnensystem, wobei es allerdings sein Kraftzentrum erhält."[7]

Faraday verhielt sich skeptisch gegenüber der traditionellen mechanischen Konzeption des Äthers. Wenn die Atome lediglich Kraftzentren, die Enden der Kraftröhren im kontinuierlichen materiellen Medium darstellen, so gibt es keinerlei Begründung dafür, die gewöhnliche Materie vom Äther zu unterscheiden. Der gewöhnlichen Materie ist im Gegensatz zum Äther Schwere und Festigkeit eigen.

[5] Ebenda, S. 400.
[6] Ebenda, S. 400–401.
[7] Ebenda, S. 403.

Aber dies, so sagt Faraday, sind rein dynamische Definitionen. Schwere — das ist Anziehung, Festigkeit — Abstoßung. Wenn also der Äther aus materiellen Kraftlinien besteht, so unterscheidet er sich in nichts von der üblichen Materie.

Diese Konzeption Faradays gehörte zu den revolutionierenden und in ihrer Bedeutung weitreichendsten Ideen in der Geschichte der Wissenschaften.

In ihr ist sowohl die Lösung der Widersprüche zwischen dynamischen und kinetischen Vorstellungen über die Stoffe und ihre Bewegung enthalten als auch ein neuer Aspekt der absoluten und relativen Bewegung herausgearbeitet. Außerdem verkörpert sie einen radikalen Übergang vom mechanischen Weltbild zu einer umfassenderen und genaueren Vorstellung über die Natur. Natürlich war all das in der Theorie Faradays nur in den allgemeinsten und elementarsten Formen enthalten. Aber der Gedanke war ausgesprochen, und in der Folge wurden die mechanistischen Konzeptionen vor allem durch die weitere Ausarbeitung der Faradayschen Theorie zurückgedrängt.

Faraday identifizierte Kraftfeld und Stoff. Das war eine völlig neue Antwort auf eine alte Frage. Leibniz hatte die Kraft zur nichtmateriellen Substanz erklärt. Eine Reihe von Anhängern des Dynamismus wollte die materiellen Atome durch nichtmaterielle Kraftzentren ersetzen und auf diese Weise das wissenschaftliche Weltbild von der materiellen Substanz befreien. Die Gegner von Leibniz und Boskovič entwickelten kinetische Modelle der Wechselwirkung von Kräften. Aber niemand vor Faraday hatte von der Materialität der Kräfte gesprochen, niemand hatte angenommen, daß das Kraftfeld nicht Resultat einer mechanischen Verschiebung ist, nicht ein formales Schema, eine Erscheinung von Monaden usw., sondern selbst eine materielle Substanz darstellt. Faraday hat das Weltbild nicht entmaterialisiert, sondern im Gegenteil das Kraftfeld zur materiellen Substanz erklärt.

2. *Optik und Äther*

Die von Faraday formulierte Idee eines materiellen Kraftfeldes konnte erst nach längerer Entwicklung der Elektrodynamik und der Optik als eindeutige und unanfechtbare Schlußfolgerung aus experimentellen Daten gewonnen werden. Vor allem war zu beweisen, daß es kein Wechselwirkungen übertragendes Medium gibt, das sich von einem realen materiellen Kraftfeld unterscheidet, daß es keinen besonderen Stoff gibt, der sich von den Kraftröhren unterscheidet, einer Substanz, die mechanische Eigenschaften besitzt und Wirkungen der Gravitation, des Lichtes, der Elektrizität und des Magnetismus überträgt. Das Licht wurde als mechanische Schwingung des Äthers angesehen. Deshalb wollte Faraday eine neue Optik ausarbeiten und experimentell begründen, in der das Licht als Schwingung eines Kraftfeldes behandelt wird.

Die Theorie des Lichtäthers war durch die bedeutenden Entdeckungen Thomas Youngs und Jean Fresnels in der den Arbeiten Faradays unmittelbar vorangehenden Periode wesentlich umgestaltet worden. 1800 hatte Young in seiner

Abhandlung über die Optik die Huygenssche Lichttheorie von neuem belebt.[8] Er trat gegen die Vorstellung des Ausströmens auf, die während des 18. Jahrhunderts vorherrschend war. Die optischen Erscheinungen boten allerdings unzureichende Beweise für die Existenz des Äthers, und seine Funktion bei der Gravitation blieb völlig unbewiesen. Deshalb wurden Argumente für die Existenz des Äthers in einem neuen Bereiche — der Elektrizität — gesucht. Schon im 18. Jahrhundert gab es Theorien, die die Elektrizität als besondere Form des sich bewegenden Äthers erklärten. Young benutzte bei der Verteidigung des Äthers zum Beispiel die Argumente Eulers, die in dessen Arbeiten über das Wesen der Elektrizität enthalten sind.

In seiner bereits erwähnten Arbeit bemühte sich Young, optische Erscheinungen in Analogie zur Akustik zu erklären. Dabei stützte er sich auf die ersten Vorläufer der mechanischen Wärmetheorie. Als entscheidendes Argument gegen die Emissionstheorie führte Young die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum und die Erscheinung ins Feld, daß Lichtstrahlen teilweise reflektiert werden und teilweise in ein durchsichtigeres Medium eindringen. Diese Erscheinungen waren leicht durch die Annahme unterschiedlicher Dichte des Äthers zu erklären. Der Vorteil einer solchen Annahme liegt in ihrem kinetischen Charakter. Young bekräftigte damit die historische Beziehung zwischen der kinetischen Theorie des Lichtes und der kinetischen Wärmetheorie. Er stützte sich dabei auf die Arbeiten von Rumford als Beweis für die Wellennatur des Lichtes und gegen die Emissionstheorie.

In seinem Kampf gegen die Newtonsche Korpuskulartheorie stützte sich Young auf Newton selbst. Newton spielte in der Wissenschaft zeitweilig eine Rolle, die derjenigen der theologischen Autoritäten ähnlich war. Wenn die Gegner der Theologie im 17. Jahrhundert genötigt waren, ihre Erwägungen in theologische Formen zu hüllen, so mußte Young im 19. Jahrhundert die Korpuskulartheorie mit Erläuterung zu einigen Abschnitten der Newtonschen „Optik" angreifen. Das Vorhaben wurde dadurch begünstigt, daß beim Begründer der Korpuskulartheorie des Lichts auch Ansätze einer Wellenauffassung vorhanden waren.

Das historische Verdienst Youngs und Fresnels besteht in der Entwicklung der Wellentheorie auf der Grundlage der Interferenzerscheinungen. Die Interferenz, bereits seit Grimaldi und Huygens bekannt, besagt, daß bei der Überlagerung zweier Lichtstrahlen dunkle Punkte entstehen. Licht wird vernichtet, aber Teilchen können sich nicht gegenseitig vernichten, das kann nur einander entgegengesetzte Bewegung.

Diese Vorstellungen über die Interferenz wurden von Fresnel entwickelt. Er erklärte diese Erscheinung durch die Überlagerung der Wellen, die von verschiedenen Punkten der strahlenden Oberfläche ausgehen. Fresnel stützte sich auf das alte Prinzip von Huygens, wonach jeder Punkt des Äthers, in dem Lichtschwingungen vonstatten gehen, wiederum zum Ausgangspunkt neuer Lichtwellen wird. Er leitete mathematisch alle Erscheinungen der Diffraktion und der Inter-

[8] Th. Young, Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light, Phil. Trans. 1800.

ferenz aus der angenommenen Existenz von Lichtwellen ab. Die genaue Übereinstimmung der theoretischen Ergebnisse mit den experimentellen Daten ließ darauf schließen, daß die Interferenz eine gesetzmäßige objektive Erscheinung ist. Die Anhänger der Emissionstheorie, die die Interferenz von ihrer Position her nicht deuten konnten, erklärten sie nämlich als subjektives Resultat physiologischer Prozesse in der Netzhaut. Fresnels Rechnungen und Experimente widerlegten diese Annahme.

Nachdem die Wellentheorie den Sieg davongetragen hatte, stieß sie jedoch auf ernsthafte innere Schwierigkeiten, auf die Frage nach dem Charakter der Lichtschwingungen. Verlaufen diese Schwingungen in Richtung der Wellenbewegung, wie das bei den Schallwellen der Fall ist, oder haben wir es in Analogie zu den Meereswellen mit transversalen Schwingungen des Äthers zu tun? Der longitudinale Charakter der Wellen würde analog zur Mechanik der Gase weitreichende Möglichkeiten für eine mechanische Äthertheorie geben. Das mechanische Bild transversaler Wellen dagegen wäre bedeutend komplizierter. Für die Beantwortung dieser Frage war die Entdeckung der Polarisation des Lichtes von entscheidender Bedeutung. Fresnel gab eine vollständige, alle beobachteten Erscheinungen umfassende Theorie der Polarisation, begründet auf der Annahme transversaler Schwingungen. Aber diese Hypothese erschwerte die Ausarbeitung eines mechanischen Äthermodells.

Die Lehre vom Äther war schon immer ein Problem für die mechanische Naturwissenschaft. Nach Planck war der Äther „das Schmerzenskind der mechanischen Theorie“[9]. Das mechanische Weltbild konnte ohne den Äther nicht auskommen, aber gleichzeitig mußte es den von ihr hervorgebrachten hypothetischen Stoff mit einander widersprechenden Eigenschaften ausrüsten. Vor allem erwies es sich als sehr schwierig, dem Äther die Eigenschaften der Dichte zuzuordnen. Huygens nahm an, daß das Licht aus Longitudinalwellen besteht. Solche Schwingungen können sich auch in einem sehr verdünnten Gas ausbreiten. Transversalwellen schließen einen gasförmigen Äther aus. Sie können nur in einem festen Körper auftreten. Hieraus resultiert die Vorstellung vom Äther als einem außerordentlich festen Stoff, der den Himmelskörpern jedoch keinen bemerkbaren Widerstand entgegensetzt.

Ein Teil der Physiker bemühte sich, diesen Widerspruch zwischen der Festigkeit des Äthers und der ungehinderten Bewegung der Planeten zu umgehen. 1845 wies Gabriel Stokes auf die Relativität des Begriffes „fester Körper“ hin. Der Äther als Träger der Lichtschwingungen könne durchaus ein außerordentlich fester Körper sein, ohne den Planeten einen merkbaren Widerstand entgegenzusetzen. Stokes vergleicht die Bewegung der Planeten im Äther mit dem langsamen Eintauchen eines Körpers in Harz oder Siegellack. Wenn eine Last längere Zeit auf einem festen Stück Harz oder Siegellack liegt, so dringt sie allmählich in dieses Stück ein wie in eine Flüssigkeit. Dagegen verhält sich das Harz bei einem Schlag unter niedriger Temperatur wie ein fester Körper und zersplittert. Somit hängt

[9] M. Planck, Die Stellung der neueren Physik zur mechanischen Naturanschauung, in: Physikalische Abhandlungen und Vorträge, Bd. 3, Braunschweig 1958, S. 35.

die Festigkeit eines Körpers davon ab, wie schnell sich die deformierende Kraft zeitlich verändert. Der Unterschied zwischen der Lichtgeschwindigkeit und der Bewegung der Planeten ist dabei bedeutend größer als der zwischen dem Schlag und dem Einsinken in die genannten Materialien. Somit kann sich der Äther bei schnellen Impulsen den Lichtschwingungen gegenüber wie ein außerordentlich fester Körper verhalten, gleichzeitig aber gegenüber der Planetenbewegung wie ein Stoff mit sehr geringer Dichte.

Die Theorie von Stokes konnte die Widersprüche der mechanischen Äthertheorie nicht lösen. In festen Körpern sind nicht nur transversale, sondern auch longitudinale Wellen möglich. Bei der Ausbreitung des Lichtes werden longitudinale Wellen aber nicht beobachtet. Aus der großen Anzahl von Hypothesen, die zur Beseitigung des Widerspruches entwickelt wurden, hat sich nicht eine in der Wissenschaft durchgesetzt. Im Verlaufe des 19. Jahrhunderts änderte sich die physikalische Interpretation der Theorie von Fresnel häufig, aber keine von ihnen konnte den Anspruch auf Unbestreitbarkeit oder wenigstens auf eine widerspruchsfreie Erklärung der grundlegenden Fakten erheben. Unumstritten dagegen blieb das mathematische Skelett der Wellentheorie. Welche Deformationen dem Äther auch zugeschrieben wurden, welche Formen der Äther auch annahm, die Behauptung, daß die Ausbreitung des Lichtes mit einfachen trigonometrischen Funktionen beschrieben werden kann, blieb unangetastet. Allerdings bildet die Kurve dieser Funktionen (Sinuskurve) nicht ein ebenso reales räumliches Modell für die Lichtschwingungen wie für die Wellen auf der Wasseroberfläche.

Im 19. Jahrhundert konzentrierte sich die Physik des Äthers auf die Frage, ob der Äther als unbewegliches Medium Bezugssystem für die mechanische Bewegung sein, ob er als materielle physikalische Verkörperung des absoluten Raumes dienen kann oder ob er von den in Bewegung befindlichen Körpern mitgerissen wird. Wollte man dieses Problem lösen, mußte man die Lichtgeschwindigkeit in einem ruhenden und einem bewegenden Medium miteinander vergleichen.

Solche Untersuchungen wurden mit verschiedenen Methoden durchgeführt: Die Geschwindigkeit des Lichtes und der sich bewegenden Medien konnte man den Resultaten astronomischer Untersuchungen entnehmen. Man versuchte aber auch, eine Veränderung der Lichtgeschwindigkeit zu erreichen, indem man die veränderte Frequenz des Lichts in Abhängigkeit von der Bewegung des Mediums bestimmte. Solche Beobachtungen sind leicht durchzuführen, weil der jeweiligen Frequenz eine bestimmte Farbe des Lichts entspricht. 1842 entdeckte Christian Doppler die Abhängigkeit der Frequenz des Lichtes von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters.[10] Die Spektralanalyse erlaubt es, eine Veränderung der Frequenz des Lichtes mit großer Genauigkeit nachzuweisen. Die Spektren der Sterne enthalten dieselben farbigen Linien wie die Lichtquellen auf der Erde, weil die Himmelskörper aus den gleichen Elementen wie unsere Erde bestehen. Bei genannten Untersuchungen zeigte sich jedoch, daß die Spektrallinien der Sterne im Verhältnis zu denen der irdischen Lichtquellen eine Verschiebung aufweisen.

[10] Vgl. Ch. Doppler, Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels, Leipzig 1907.

Ein halbes Jahr lang waren alle Spektrallinien einiger Himmelskörper nach der violetten Seite des Spektrums hin verschoben, d. h. nach der Seite der größeren Frequenz. Im darauffolgenden Halbjahr bewegten sie sich in Richtung des roten Endes des Spektrums, d. h. nach der Seite geringerer Frequenz. Diese Verschiebung der Spektrallinien ist als Dopplereffekt bekannt, sie wird durch die Bewegung der Erde um die Sonne hervorgerufen. Im Verlaufe eines halben Jahres nähert sich die Erde bestimmten Sternen, um sich dann wieder von ihnen zu entfernen. Auch die Fixsterne bewegen sich und können sich der Erde nähern oder sich von ihr entfernen. Die sich daraus ergebenden Veränderungen des Spektrums weisen aber keine jährliche Periodizität auf. Später wurde der Dopplereffekt auch bei der Bewegung von Lichtquellen auf der Erde beobachtet.

Der Dopplereffekt weist jede relative Bewegung zwischen Lichtquelle und Beobachter deutlich nach. Aber kann dadurch auch die absolute Bewegung des Beobachters und der Lichtquelle, d. h. ihre Bewegung in bezug auf das umgebende Medium, bewiesen werden? Wenn der Dopplereffekt bei gleicher Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters verschwindet, so sind die optischen Erscheinungen nur durch die relative Bewegung bedingt. Im entgegengesetzten Falle könnte man annehmen, daß die Ursachen in einer absoluten Bewegung zu suchen sind. Wenn in einem System, in dem Lichtquelle und Beobachter während der Bewegung einen konstanten Abstand einhalten, der Dopplereffekt ebenfalls auftreten würde, so könnte man behaupten, daß sich das System bewegt, ohne es zu verlassen. Damit wäre eine absolute Bewegung nachgewiesen.

Für solche Versuche konnte man allerdings das Licht der Sterne nicht verwenden, da deren Bewegung vom Menschen nicht zu beeinflussen ist. Man mußte auf irdische Lichtquellen zurückgreifen. Theoretische Berechnungen zeigten jedoch, daß auch bei angenommenem ruhendem Äther die dem Dopplereffekt entsprechende Verschiebung der Spektrallinien zu gering wäre, um beobachtet werden zu können. Wie kann man aber Lichtquelle und Beobachter mit einer Geschwindigkeit bewegen, die der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist? Die Natur gab die Möglichkeit, sich einer außerordentlich schnellen Bewegung zu bedienen, nämlich der Bewegung der Erde. Ein Punkt der Erdoberfläche bewegt sich durch die Drehung der Erde um ihre Achse mit einer Geschwindigkeit, die die Geschwindigkeit eines jeden Transportmittels übersteigt. Noch schneller bewegt sich ein jeder Punkt der Erdoberfläche, indem er an der jährlichen Umkreisung der Sonne durch die Erde teilnimmt. Aber im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne immer noch gering. Größen, die vom Verhältnis der Geschwindigkeit des Körpers zur Geschwindigkeit des Lichtes abhängen, nennt man Größen erster Ordnung. Die Mehrzahl der zu beobachtenden optischen Erscheinungen, die mit der Bewegung materieller Körper verbunden sind, hängt jedoch von vielfach kleineren Größen ab, die durch das Quadrat des Quotienten der genannten Geschwindigkeiten bestimmt sind. Für die Bewegung der Erde um die Sonne ist dieses Quadrat annähernd gleich 0,00000001.

Größen, die dem Quadrat dieses Verhältnisses proportional sind, nennt man Größen zweiter Ordnung. Vergleicht man die Lichtgeschwindigkeit in einem

System, das sich den Strahlen entgegen bewegt, mit der in einem ruhenden System, so muß man in der Mehrzahl der Fälle mit Größen zweiter Ordnung rechnen. Am einfachsten ist es, Lichtquellen auf der Erde zu benutzen und die Geschwindigkeit ihrer Strahlen parallel und senkrecht zur Erdbewegung zu vergleichen. Im ersten Falle kommen die Strahlen dem sich bewegenden System entgegen oder überholen es; im zweiten Falle werden die Geschwindigkeiten der Erdbewegung und des Lichts nicht addiert oder subtrahiert. Bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Erdbewegung beobachtet man eine mittlere Geschwindigkeit der Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungen in beiden Richtungen. Der Lichtstrahl durcheilt eine bestimmte Entfernung und kehrt dann zum Ausgangspunkt zurück. Die Geschwindigkeit dieser Bewegung kann von der Bewegung des Mediums — in diesem Falle der Erde — abhängen oder auch nicht. Wenn sich die Bewegung auf die Lichtgeschwindigkeit auswirkt, so muß die Abweichung eine Größe zweiter Ordnung sein. Das kann durch eine einfache Rechnung nachgewiesen werden. Wenn das Licht zuerst in der einen, dann aber in der umgekehrten Richtung eine bestimmte Strecke durchläuft, so heben sich die verringerte Zeit, die für die erste Teilstrecke benötigt wird, und die vergrößerte Zeitspanne, die der Rückweg erfordert, gegenseitig nicht völlig auf. Die Zeit des Durchganges des Lichts in Richtung der Erdbewegung ist gleich $x/(c-v)$, in der entgegengesetzten Bewegung aber gleich $x/(c+v)$ (wobei c die Lichtgeschwindigkeit, v die Geschwindigkeit der Erde ist). Addiert man diese beiden Größen, so erhalten wir die Zeit, die für die Ausbreitung des Lichtes in beide Richtungen benötigt wird. Sie ist gleich

$$\frac{2xc}{c^2 - v^2}.$$

Um die mittlere Geschwindigkeit des Lichtes für den Hin- und Rückweg zu erhalten, hat man den durchlaufenen Weg — $2x$ — durch die Zeit, die das Licht für diese Strecke benötigt, zu dividieren. Man erhält

$$c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right).$$

Diese mittlere Geschwindigkeit ist vom Quadrat des Quotienten v/c, d. h. von einer Größe zweiter Ordnung, abhängig. Um eine solche verschwindend kleine Größe verändert sich die Lichtgeschwindigkeit entlang der Erdbewegung, wenn der Äther sich nicht mit der Erde bewegt. Aber schon die Versuche, Größen erster Ordnung experimentell nachzuweisen, blieben erfolglos.

Die vergeblichen Bemühungen, die Bewegung der Körper relativ zum Äther nachzuweisen, führten zu einer anderen Hypothese. 1845 setzte Stokes voraus, daß der Äther vollständig an der Bewegung der materiellen Körper teilnimmt. Hieraus ergibt sich das Relativitätsprinzip optischer Erscheinungen. Optische Prozesse verlaufen in einem bewegten Medium, zum Beispiel auf der Oberfläche der Erde, in derselben Art und Weise wie im ruhenden Medium. Stokes mußte

allerdings eine komplizierte Theorie ausarbeiten, um die Unbeweglichkeit des Äthers im Weltenraum und seine Bewegung in den Körpern zu erklären. Diese Konzeption widersprach den grundlegenden Gesetzen der Mechanik. Außerdem gab es Experimente, deren Ergebnis nur die Annahme einer teilweisen Bewegung des Äthers mit den Körpern zuließ.

1851 konstruierte Fizeau ein Interferometer, in dem beide Strahlen durch ein Rohr geleitet wurden, durch das Wasser floß.[11] Ein Strahl breitete sich gegen die Strömung, ein anderer mit der Strömung aus. Sollte das Wasser den Äther mitführen, so müßte sich eine bestimmte Abweichung des Interferenzbandes ergeben. Es wurde wirklich eine gewisse Veränderung beobachtet. Sie entsprach aber nicht der Hypothese eines vollständig mitgeführten Äthers.

Somit ließ sich der Äther nicht in das mechanische Weltbild einordnen. Er konnte weder als absoluter Bezugskörper dienen noch als sich mit den Körpern bewegend angenommen werden. In der vorherrschenden Äthertheorie des 19. Jahrhunderts sah man das Fehlen eines Ätherwindes, d. h. die Unmöglichkeit, die absolute Bewegung, das optische Relativitätsprinzip experimentell zu beweisen, durchaus nicht als fundamentales Prinzip an. Im Gegenteil, man interpretierte dieses Ergebnis nur als Resultat einer gegenseitigen Aufhebung der Veränderung der Lichtgeschwindigkeit durch die Bewegung in entgegengesetzten Richtungen, wobei die Abweichungen dem Quadrat des Quotienten der Geschwindigkeit des Körpers zur Lichtgeschwindigkeit proportional sind. Anders ausgedrückt, die Äthertheorie erklärte das Fehlen eines Ätherwindes dadurch, daß die Abweichungen nur in Größen zweiter Ordnung auftreten. Die Theorie Fresnels zog aus der Annahme einer teilweisen Mitführung des Äthers den Schluß, daß der Ätherwind in Wirkungen erster Ordnung nicht zu beobachten sei, daß die Veränderungen der Lichtgeschwindigkeit in bewegten Medien Größen erster Ordnung nicht erreichen.

Die somit geschaffene Situation widersprach der klassischen Mechanik und erschütterte die mechanische Konzeption des Äthers. Angenommen, der Äther unterliegt den Newtonschen Bewegungsgesetzen, so erlangt er, sich selbst überlassen, eine bestimmte Beschleunigung und in einem bestimmten Inertialsystem auch eine Ruhestellung. Wenn auf den Äther eine Kraft wirkt, muß er eine Beschleunigung proportional dieser Kraft erfahren. Diese Beschleunigung ist, bezogen auf den Übergang zu einem anderen Koordinatensystem, invariant. Hinsichtlich der Beschleunigung sind alle Inertialsysteme gleichgestellt, und der Äther entspricht somit dem Relativitätsprinzip der Newtonschen Mechanik. Daraus folgt aber, daß der Äther auch die klassische Regel der Addition der Geschwindigkeiten befolgen muß. Wenn die Beschleunigung und die Kräfte beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen invariant bleiben, so verändert sich die Geschwindigkeit. Die Ausbreitung des Lichtes muß, wie auch die Bewegung anderer Körper, in unterschiedlichen sich relativ zueinander bewegenden Inertialsystemen verschiedene Geschwindigkeiten annehmen. Das Experiment

[11] H. L. Fizeau, Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur, in: Comptes rendus, Bd. 33, 1851, S. 349.

führte jedoch zu anderen Ergebnissen: es wies die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit beim Übergang von einem System zum anderen nach. Aus dieser Invarianz folgt, daß die optischen Eigenschaften die Bewegung eines Systems relativ zum Äther nicht nachweisen können, daß der Äther nicht als absoluter Bezugskörper dienen kann. Hierin besteht das optische Prinzip der Relativität. Es unterscheidet sich grundlegend vom Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik. In letzterem geht es um die Invarianz der Beschleunigung, das optische Prinzip der Relativität dagegen enthält die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit, ihre Unabhängigkeit von der Bewegung des Systems, das die Lichtquelle und den Beobachter, d. h. die Körper, umfaßt, die das Licht ausstrahlen und aufnehmen.

Dieser Konflikt zwischen der mechanischen und optischen Relativität fand erst im 20. Jahrhundert in der Theorie Albert Einsteins seine Lösung. Zuvor aber wandelte er sich in einen Konflikt zwischen Mechanik und Elektrodynamik. Die Elektrodynamik hatte schon in der Theorie Wilhelm Webers die Annahme von der Bewegung unabhängiger Kräfte angegriffen. Nun stand im Resultat aller ihrer Versuche zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in bewegten Medien die Optik im Widerspruch zu den klassischen Bewegungsgesetzen. Dieser Widerspruch nahm neue Formen an, nachdem Maxwell Optik und Elektrodynamik in einer Theorie vereinigt hatte. Es war eine Theorie der Nahwirkung, die sich eindeutig aus quantitativen Beziehungen ergab, die in der Folge experimentell bestätigt wurden.

3. Die Maxwellsche Methode

Durch die Annahme realer Kraftlinien konnte Faraday alle damals bekannten Fakten rational erklären. Aber seine Erklärung war nicht die einzig mögliche. Die Theorien der Fernwirkung konnten ebenfalls eine widerspruchsfreie Interpretation der experimentellen Ergebnisse geben. Faraday hat diesen Umstand nicht völlig erkannt. Er war der Meinung, daß die Ausbreitung der Induktion von Punkt zu Punkt entlang der Krümmungslinien ein unanfechtbares Argument gegen die Fernwirkungstheorie darstelle. Die entscheidenden Experimente jedoch, die wirklich der Fernwirkung widersprachen, wurden erst bedeutend später durchgeführt. Als die Elektrodynamik mit Maxwell Mitte des 19. Jahrhunderts an einem Kreuzweg stand, gab es noch kein experimentum crucis, das den einzig richtigen Weg hätte zeigen können. Die Wahl jedoch war getroffen.

In seinem Aufsatz „Über Faradays Kraftlinien" erläuterte Maxwell seine Forschungsmethode im Bereiche des Elektromagnetismus. Er forderte eine Untersuchungsmethode, „welche uns bei jedem Schritt zu einer klaren physikalischen Anschauung befähigt ..."[12]

Schon in dieser Arbeit zeigen sich zwei fundamentale Besonderheiten der Maxwellschen Methode: 1. Die mathematische Analyse verschmilzt mit der physikalischen, weil die mathematische Abstraktion immer einen physikalischen Sinn

[12] J. C. Maxwell, Über Faradays Kraftlinien, Leipzig 1895, S. 4.

behält; 2. die untersuchten physikalischen Prozesse werden nicht mit den verwendeten mechanischen Modellen gleichgesetzt. In entsprechenden Gegenüberstellungen werden sowohl Ähnlichkeiten mit mechanischen Prozessen als auch Unterschiede hervorgehoben. Dieser nichtmechanische Charakter des physikalischen Inhalts wird offensichtlich, sobald Maxwell seine Methode anwendet.

Er errichtet ein geometrisches Modell elektrischer und magnetischer Kräfte, das ihre Richtung angibt. Man muß aber auch die Intensität dieser Kräfte in jedem Punkte darstellen. „Letzteres gelingt, wenn wir diese Kurven nicht als bloße Linien, sondern als Röhren von veränderlichem Querschnitt betrachten, in denen eine unzusammendrückbare Flüssigkeit fließt.“[13]

Was ist das für eine unzusammendrückbare Flüssigkeit? Maxwell unterstreicht wiederholt, daß es sich durchaus nicht um eine hypothetische elektrische Flüssigkeit handelt, daß die elektrischen Kräfte dieser Flüssigkeit nur ähnlich sind. Der nichtmechanische Charakter dieser Analogie ist aus jeder Zeile erkennbar, die Maxwell über dieses Problem schreibt.

„Der Substanz, um welche es sich hier handelt, soll keine von den Eigenschaften der gewöhnlichen Flüssigkeiten zugeschrieben werden, mit Ausnahme der Fähigkeit der Bewegung und des Widerstandes gegen Zusammendrückung. Diese Substanz ist nicht einmal eine hypothetische Flüssigkeit in dem Sinne, wie solche von älteren Theorien zur Erklärung der Erscheinungen angenommen wurden. Sie ist lediglich ein Inbegriff imaginärer Eigenschaften, welcher den Zweck hat, gewisse Theoreme der reinen Mathematik in einer anschaulicheren und auf physikalische Probleme leicht anwendbaren Form darzustellen, als es durch Anwendung rein algebraischer Symbole geschehen kann.“[14]

Um den Sinn dieser Analogie zu verstehen, sei daran erinnert, daß Maxwell dieser Flüssigkeit bei großem Widerstande des Mediums, in dem sich die Flüssigkeit bewegt, die Eigenschaft der Trägheit abspricht. Das ist schon kein geometrisches, sondern bereits ein mechanisches Modell. In einem solchen Modell kann fehlende Trägheit des sich bewegenden Körpers nur einen Grenzfall darstellen, wenn die Dichte der Flüssigkeit sich verringert, der Widerstand aber wächst. In den rein mechanischen (hydromechanischen) Modellen der Cartesianer wurde angenommen, daß vergleichbare Prozesse ihrer Natur nach gleich sind. Bei Maxwell spiegelt die bedingte Gegenüberstellung die Überzeugung wider, daß ein materielles Medium mit nichtmechanischen und auch nicht auf die Mechanik zurückführbaren Eigenschaften existiert.

Maxwells Methode kann somit in gewissem Grade der Methode von Lagrange gegenübergestellt werden. In seinem „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus“ schreibt Maxwell: „Lagrange hatte sich in seinem zitierten Werke die Aufgabe gestellt, die Dynamik der Macht des Kalküls zu unterwerfen. Demzufolge beginnt er damit, daß er die elementaren Relationen für die dynamischen Größen genau in der Ausdrucksweise der entsprechenden Relationen, die zwischen rein algebraischen Größen walten, aufstellt. Aus den so erhaltenen Grundgleichungen leitet er dann lediglich durch Rechnung seine Endgleichungen ab. Lagranges Me-

[13] Ebenda, S. 8.
[14] Ebenda, S. 9.

thode besteht vom mathematischen Standpunkt betrachtet in der Elimination gewisser Größen, die in den gewöhnlichen Gleichungen für die Bewegung der zusammensetzenden Teile eines Systems auftreten, aus denselben, in der Herstellung der von diesen Größen befreiten Endformeln.

Die Verfolgung der einzelnen Schritte dieser Elimination ist sehr dazu angetan, den Studierenden mit mathematischen Rechnungen und Operationen vertraut zu machen, für diesen Zweck ist es daher von Vorteil, wenn man in der Ableitung der Endgleichungen von dynamischen Begriffen möglichst wenig Gebrauch macht. Wir wollen aber gerade für unser dynamisches Wissen Vorteil ziehen, daher werden wir uns zwar der Vorarbeit der Mathematiker bedienen, ihre Resultate aber aus der Sprache des Kalküls in die der Dynamik übersetzen. Die Sätze, zu denen wir gelangen, sollen dann dem Leser nicht mathematische Operationen, sondern gewisse Eigenschaften, die den Körpern, wenn sie sich bewegen, zukommen, vor sein geistiges Auge führen."[15]

Die Mathematisierung der Physik bei Lagrange und die Physikalisierung der Mathematik bei Maxwell sind zwei sich vereinigende Strömungen wissenschaftlichen Denkens. Wir haben es hier mit zwei Seiten ein und desselben Prozesses zu tun. Lagrange gab mit seinen Arbeiten, die auf dem Variationsprinzip basierten, mathematische Verallgemeinerungen der Mechanik, die auch auf nichtmechanische Prozesse angewendet werden konnten. Maxwell fand für die Gleichungen von Lagrange mit Hilfe bedingter Analogien ein nichtmechanisches physikalisches Äquivalent.

Maxwell legte seine Methode in besonders klarer Form in seinen Ausführungen über die Beziehungen zwischen Mathematik und Physik dar. Auf diese Thematik kam er immer wieder zurück. In seinem Artikel „Über die mathematische Klassifikation physikalischer Größen" erwog Maxwell die Möglichkeit, mit denselben mathematischen Methoden ihrer Natur nach verschiedene Größen zu untersuchen.[16] Die negative Aussage — der gleiche Formalismus führt nicht zur Gleichsetzung elektromagnetischer und mechanischer Prozesse — ist die Kehrseite der positiven Aussage, daß man physikalisch nicht identische Erscheinungen mit Hilfe allgemeiner mathematischer Methoden untersuchen kann.

Maxwell entwickelte Vorstellungen von einheitlichen mathematischen Forschungsmethoden für unterschiedliche physikalische Prozesse. Er führte eine Vielzahl von Beispielen an, die historisch interessant sind, weil sie die Wurzeln der Maxwellschen Ideen in der Physik des 19. Jahrhunderts erkennen lassen. Besonders oft verwies Maxwell auf die Wärmetheorie. Er unterstrich auch die Bedeutung physikalischer Analysen für die Entwicklung mathematischer Methoden. Für die Mathematik war nach Maxwell äußerst wichtig, das physikalische Wesen ihrer Abstraktionen nicht aus dem Auge zu verlieren. Er wies besonders darauf hin, daß den Mathematikern die Lösung physikalischer Probleme durch Kenntnisse in dem speziellen Bereich, dem die Aufgabe entstammt, sehr er-

[15] J. C. Maxwell, Lehrbuch der Electrizität und des Magnetismus, Bd. 2, a. a. O., S. 241 bis 242.

[16] J. C. Maxwell, Remarks on the mathematical classification of physical quantities, in: Proc. Lond. Math. Soc., Bd. 3, 1871, S. 224—232.

leichtert wird. In diesem Zusammenhang empfahl er auch, der Klassifikation von Größen mehr Aufmerksamkeit zu schenken.

Maxwell teilte die mathematischen Größen in Skalare und Vektoren ein und verglich die von Hamilton entwickelte Quaternionenrechnung mit der Erfindung des Koordinatensystems durch Descartes. Er skizzierte die nächsten Schritte in der Entwicklung der Mathematik, die für die Analyse neuer physikalischer Begriffe unbedingt erforderlich wurden.

In seinen Arbeiten ging Maxwell vom Begriff der Energie aus, der zum zentralen Begriff der Physik seit Mitte des 19. Jahrhunderts geworden war. Er stand im Mittelpunkt der Maxwellschen Arbeiten über die Theorien der Elektrodynamik und der Gase. Maxwell hielt diesen Begriff nicht nur für die Physik, sondern auch für die Verallgemeinerung der Vektorrechnung für sehr bedeutsam. Er sah bereits Entwicklungsrichtungen voraus, die die Mathematik erst in der Folgezeit einschlug.

Maxwell wies nach, daß es die Entdeckung von Stoffen, die in verschiedener Richtung unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen, erlaubt, zwischen Kräften und Flüssen in dem Sinne zu unterscheiden, in dem er diese Termini gebrauchte. Diese Unterscheidung wurde zum Ausgangspunkt wichtiger mathematischer Ergebnisse. Maxwell schlug vor, den Laplace-Operator Δ die Konzentration der Größen zu nennen, auf die der Operator anwendbar ist, und den Terminus „Gefälle" (slope) einzuführen, der heute gewöhnlich als Gradient einer skalaren Größe bezeichnet wird, um das Resultat der Anwendung des Hamilton-Operators auf skalare Größen zu charakterisieren.

Das Resultat der Anwendung des Hamilton-Operators auf eine Vektorfunktion kann ein Skalar — Maxwell schlug vor, es Konvergenz zu nennen (heute als Divergenz bezeichnet) — oder ein Vektor „curl" (heute „rot") sein. Diese kurze Darlegung und teilweise Entwicklung der Vektorrechnung und der Vektoranalysis wurde später in systematischerer Form in der Einleitung seines „Lehrbuches der Elektrizität und des Magnetismus" wiederholt. Von der Maxwellschen Terminologie blieb lediglich der Ausdruck „curl" für den Wirbel (rot) erhalten.

Damit wird verständlich, weshalb Maxwell von der „mathematischen Methode" Faradays sprach, obwohl jener keine einzige analytische Formel in seine Untersuchung einbezogen hatte. Maxwell war der Meinung, daß bestimmte neue Methoden der Mathematik aus den physikalischen Ideen Faradays hervorgegangen sind. In seinem Artikel über Faraday wies Maxwell darauf hin, daß wir in dessen Werken keine Differential- und Integralgleichungen finden, die für viele Wissenschaftler erst das eigentliche Wesen einer exakten Wissenschaft darstellten.[17] In den Arbeiten von Poisson und Ampère, von Weber und F. Neumann sind zum Beispiel viele Formeln enthalten, die Faraday vielleicht gar nicht verstanden hätte. Trotzdem kann man bei Faraday von einer mathematischen Methode sprechen, weil Formeln bei weitem nicht die Mathematik ausmachen.

Heute ist uns sowohl die Form als auch der Inhalt der mathematischen Ideen bekannt, die der Physik der Nahwirkung bei Faraday und Maxwell entsprechen. Ihr sichtbares Ergebnis ist die Entwicklung der Vektor- und der Tensoranalysis.

[17] J. C. Maxwell, Faraday, in: The scientific papers. Bd. 2, a. a. O.

Letztlich sind aber auch noch allgemeinere Richtungen der Mathematik mit der Physik der Nahwirkung verbunden. Die Mathematik der Funktionen, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde, wurzelt zum Beispiel ebenfalls in der Physik. Hierbei nahm die auf der Nahwirkung basierende elektrodynamische Theorie einen hervorragenden Platz ein. Sie ermöglichte es, die Abhängigkeit geometrischer Eigenschaften des Raumes von den in ihm vor sich gehenden physikalischen Prozessen zu begründen.

Die nichteuklidische Geometrie sowie der Gedanke möglicher von der euklidischen Geometrie abweichender Eigenschaften des realen Raumes wirkten revolutionierend auf die Entwicklung der Wissenschaft. Sie enthielten die ersten Hinweise auf mögliche physikalische Theorien, die die Probleme der geometrischen Eigenschaften des Makrokosmos und des Mikrokosmos entscheiden konnten. Riemann ging offensichtlich von neuen physikalischen Ideen aus, und seine Arbeiten sind nicht nur logisch, sondern unmittelbar historisch mit der Elektrodynamik verbunden.

Eine echte physikalische Interpretation der Ideen Lobačevskijs und Riemanns wurde erst ein halbes Jahrhundert nach der Maxwellschen Theorie gegeben. Aber ihren historischen Ausgangspunkt bildete die Entwicklung und die Verallgemeinerung der klassischen Elektrodynamik. In den 60er und 70er Jahren des 19. Jahrhunderts fand man die ersten Tendenzen zu einer physikalischen Geometrie, in der jede mathematische Abstraktion einen physikalischen Inhalt besitzt, jeder Schritt der mathematischen Ableitung physikalisch sinnvoll ist, jedes mathematische Symbol einen physikalischen Begriff darstellt.

Ampère, F. Neumann, Weber und andere Begründer der vormaxwellschen Theorie des Elektromagnetismus gaben zwar den Resultaten der mathematischen Berechnungen einen physikalischen Sinn, aber durchaus nicht den dazwischenliegenden Schritten. Auch diese Methode erwies sich als fruchtbar. Maxwell demonstrierte jedoch die besondere Bedeutung solcher mathematischen Konstruktionen für die neue Theorie, in denen die mathematische Analyse untrennbar mit den physikalischen Modellen verbunden war. Dieser Wesenszug der Maxwellschen Arbeiten rief nach den Worten von Poincaré Unbehagen bei den Wissenschaftlern hervor, die an Arbeiten in rein analytischem Sinne gewöhnt waren. Die Methode Maxwells verärgerte besonders die französischen Wissenschaftler, die unter dem Einfluß der Begründer der analytischen Mechanik standen. Einige sprachen den wissenschaftlichen Abstraktionen Maxwells prinzipiell jeglichen Inhalt und jegliche Realität ab. Duhem äußerte über das Lehrbuch Maxwells: „... wir glaubten in die friedliche und sorgfältig geordnete Behausung der deduktiven Vernunft einzutreten, und befinden uns in einer Fabrik."[18] Seiner Meinung nach war das Lehrbuch Maxwells völlig unnützerweise in eine mathematische Form gekleidet worden, da es sowieso kein logisches System enthielt. In der Tat widersprach nach den Worten von Felix Klein das Lehrbuch Maxwells durch seine „massive Realistik" den Traditionen.[19]

[18] P. Duhem, Ziel und Struktur der physikalischen Theorien, Leipzig, 1908, S. 88.
[19] F. Klein, Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert, Bd. 1, Berlin 1926, S. 242.

Maxwell war der Meinung, daß jeder Physiker gut daran täte, wenn er, ehe er das Wort Masse oder das entsprechende Symbol niederschreibt, mit eigenen Händen ein Gewicht an einen Faden hängen und ihm einen Stoß versetzen würde. Diese halb scherzhafte Bemerkung charakterisiert das gegenständliche physikalische Denken Maxwells. Man muß jedoch hervorheben: die „Gegenstände", die diese Vergegenständlichung charakterisieren, sind keine Körper, die ihre Lage im Raum durch Verschiebung ändern, sondern materielle Objekte nichtmechanischen Charakters. Die Physiker, in der Tradition einer mechanischen Erklärung physikalischer Prozesse erzogen, überzeugten sich beim Lesen des „Lehrbuches der Elektrizität und des Magnetismus" sehr schnell davon, daß den Autor eigentlich gar nicht interessierte, welches spezielle mechanische Modell zur Beschreibung des elektromagnetischen Feldes benutzt wird. Die Vieldeutigkeit solcher Modelle ließ insgesamt den Verdacht der Relativität mechanischer Erklärungen entstehen.

Poincaré drückte diesen Gedanken als erster aus, nachdem ihn andere bereits vage empfunden hatten. Er schrieb, daß das Lehrbuch von Maxwell alle Behauptungen ausschließt, die sich auf ein konkretes mechanisches Modell beziehen, und daß es nur das enthält, was unabhängig vom konkreten Modell gültig bleibt. Die mechanischen Modelle werden nur bedingt verwendet, und das ruft beim Leser einen inneren Protest hervor, weil er an eindeutige mechanische Modelle gewöhnt war, die als eigentlich physikalische und einzig mögliche Interpretation der Erscheinungen angesehen wurden.

„Im ganzen Werke finden wir das Wesentliche, d. h. das, was allen Theorien gemeinsam bleiben muß, besonders hervorgehoben; was sich dagegen nur mit einer speziellen Theorie vereinigen ließe, darüber geht er fast stets mit Stillschweigen hinweg. Der Leser sieht sich also einer von Materie fast leeren Form gegenüber, die er anfänglich für einen flüchtigen wesenlosen Schatten zu halten geneigt ist. Aber die Anstrengungen, die er zu machen gezwungen ist, veranlassen ihn zum Nachdenken und er erkennt schließlich, was bei den genannten Theorien, die er früher bewundert hatte, einigermaßen erkünstelt ist."[20]

Poincaré ist der Meinung, daß Maxwell keine mechanische Erklärung der elektrischen Erscheinungen gibt: „Er beschränkt sich vielmehr darauf, nachzuweisen, daß solch eine Erklärung möglich ist."[21]

In diesem Zusammenhang unterwirft Poincaré das Problem der Eindeutigkeit mechanischer Erklärungen einer speziellen Analyse. Die mechanische Deutung operiert mit Koordinaten eines bestimmten Systems (eventuell auch eines hypothetischen Systems, das die „verdeckte Bewegung" einschließt), stellt Differentialgleichungen auf, die diese Koordinaten mit der Zeit verbinden, geht von diesen Gleichungen zu anderen über, die die beobachteten physikalischen Erscheinungen (Veränderungen bestimmter physikalischer Parameter) miteinander verknüpfen. Die Übereinstimmung der errechneten Veränderungen der Parameter mit den beobachteten erbringt, wie Poincaré zeigt, keinen Beweis für die Eindeutigkeit

[20] H. Poincaré, Elektrizität und Optik, Bd. 1, Berlin 1891, S. 7.
[21] Ebenda, S. 2.

mechanischer Erklärungen, weil eine unendliche Vielzahl anderer mechanischer Systeme mit anderen Koordinaten existieren kann, die ebenfalls mit den Experimenten übereinstimmende Resultate ergibt.

Die Vieldeutigkeit mechanischer Erklärungen führt in den Arbeiten Poincarés zu konventionalistischen Schlußfolgerungen. Für ihn ist die mechanische Erklärung ein Synonym für wissenschaftliche Erklärung. Die Vieldeutigkeit mechanischer Interpretationen wird als Beweis für die Bedingtheit und die Subjektivität der wissenschaftlichen Erkenntnisse angesehen.

In Wirklichkeit deutete die Vieldeutigkeit mechanischer Erklärungen, die die in den Traditionen von Lagrange und Laplace erzogenen Wissenschaftler so hart traf, einen Übergang zur Erforschung neuer Kausalbeziehungen der objektiven Welt, zu genaueren Vorstellungen über die Realität an.

Bereits die Thermodynamik hatte sich in gewisser Beziehung von den mechanischen Modellen gelöst: Die Bewegung der einzelnen Moleküle wurde ignoriert, niemand versuchte Aufgaben zu lösen, die unzählige Bewegungsgleichungen und Anfangsbedingungen der einzelnen Moleküle enthielten. In der Elektrodynamik erfolgte eine weitere Einschränkung. Hier war sogar uninteressant, welches mechanische System die elektrodynamischen Prozesse beschrieb. Das Fehlen jeglicher mechanischer Modelle hinter den Kulissen der Elektrodynamik der neunziger Jahre war allerdings noch kaum vorauszusehen. Die Genialität Maxwells bestand nicht nur darin, daß er Gleichungen entwickelte, die von der Wahl der mechanischen Interpretation unabhängig waren, sondern auch darin, daß diese Gleichungen überhaupt unabhängig von der Existenz einer mechanischen Interpretation waren.

In dieser Beziehung hob die Elektrodynamik die Physik auf eine prinzipiell höhere Stufe. Die Mechanik diskreter Teilchen gab keinen Anlaß für die Frage nach der Vieldeutigkeit der Interpretation beobachteter Erscheinungen. Die geozentrische Erklärung der sichtbaren Bewegung der Sonne und der Sterne erwies sich als nicht übereinstimmend mit dem Heliozentrismus. Aber in den auf der Erde vor sich gehenden Prozessen wurde die Frage nach der Eindeutigkeit des Bezugskörpers immer eindeutig entschieden. Das Studium (und schließlich auch die Anwendung) der molekularen Prozesse erbrachte die Vieldeutigkeit der mikroskopischen mechanischen Modelle für die makroskopischen Gesetze der Thermodynamik. Die Elektrodynamik zeigte, daß die Existenz eines mechanischen Modells der elektrischen und magnetischen Erscheinungen nicht aus den Gleichungen hervorgeht, die die Beziehungen zwischen den beobachteten Parametern beschreiben. Deshalb bereitete die Anerkennung der Vieldeutigkeit mechanischer Erklärungen in der Elektrodynamik (im Unterschied zur Thermodynamik) die prinzipielle Absage an die mechanische Naturauffassung unmittelbar vor.

Später versuchte man, mechanische Prozesse durch nichtmechanische Modelle zu veranschaulichen. Aber das war bereits Resultat einer langwierigen Entwicklung, in der die Elektrodynamik eine außerordentlich wichtige Rolle gespielt hatte.

Der eigentliche historische Sinn der mechanischen Analogien bei Maxwell besteht darin, daß die Eliminierung der mechanischen Grundlage elektromagne-

tischer Erscheinungen aus dem Weltbild mit der Konstatierung einer realen nichtmechanischen materiellen Substanz des elektrischen Feldes verbunden war.

Diese Konzeption wurde von Faraday entworfen, aber erst Maxwell entwickelte sie zu einer Theorie, die es ermöglichte, das real existierende elektrische Feld experimentell nachzuweisen. In dieser Theorie wurde das elektromagnetische Feld durch Differentialgleichungen beschrieben, die die Entdeckungen Oersteds, Ampères und Faradays verallgemeinerten: Die Faradaysche Leiterschleife mit dem bei der Bewegung der Schleife im magnetischen Feld induzierten Strom zieht sich in der Theorie Maxwells zu einem Punkt zusammen. Wir erhalten ein einfaches Gesetz, das das elektrische Feld in einem gegebenen Punkt mit der Veränderung des magnetischen Feldes verbindet. Das Zusammenziehen der Kraftlinien des elektrischen Feldes in einem Punkt ermöglicht es, die Struktur des Feldes durch partielle Differentialgleichungen zu beschreiben. Die entsprechenden von Oersted entdeckten magnetischen Kraftlinien konzentrieren sich ebenfalls in einem Punkt, und diese Konzeption gibt die Möglichkeit, auch die Abhängigkeit des magnetischen Feldes von dem sich ändernden elektrischen Feld durch Differentialgleichungen auszudrücken.

4. Die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes

Die Maxwellschen Gleichungen sind mehr als nur eine Übersetzung der Ideen Faradays in die Sprache der Mathematik. Sie geben darüber hinaus die Möglichkeit, die Veränderung des Feldes in Raum und Zeit zu bestimmen, wenn die Anfangs- und Randbedingungen gegeben sind. Sie ergeben Schlußfolgerungen, die aus dem einfachen Modell der Kraftröhren mit Zugkräften in ihrer Längsrichtung und einem Druck quer zu den Kraftlinien nicht abgeleitet werden konnten. Diese Folgerungen gestatten eine experimentelle Überprüfung und ermöglichen es somit, die Frage nach der Realität des Feldes experimentell zu entscheiden.

Der historische Unterschied zwischen den physikalischen Ideen Faradays und der Theorie Maxwells besteht vor allem im Unterschied zwischen Absicht und Ausführung. Das verkleinert keineswegs die wissenschaftlichen Leistungen Faradays. Im Gegenteil, je größer das historische und logische Intervall ist, das die Ausführung von der Idee trennt, um so kühner war offensichtlich die Idee. Alle Versuche, die Differenzen in den Erklärungen des statischen, stationären und quasistationären Feldes mittels Nahwirkung oder Fernwirkung aufzudecken, wurden von einer exakten Theorie abgelöst. Einzig diese Theorie gab Experimente an, die wirklich gestatteten, zwischen Nah- und Fernwirkung zu entscheiden. Grundgrößen der Maxwellschen Theorie waren die elektrische und magnetische Feldstärke. Sie sind ihrerseits Funktionen von vier unabhängigen Veränderlichen, drei Raumkoordinaten und der Zeit.

Die Maxwellschen Gleichungen gehen von der Veränderung der elektrischen und magnetischen Feldstärke aus. Die Erregung des Feldes breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit von Punkt zu Punkt aus. Seine Struktur wird durch par-

tielle Differentialgleichungen beschrieben, die Differentialquotienten der Feldstärke nach den Raumkoordinaten und nach der Zeit enthalten.

Wie kam Maxwell zu diesen Gleichungen? Zu Beginn seien die Maxwellschen Gleichungen in ihrer heutigen Form ins Gedächtnis gerufen, die sie in den Arbeiten von Heinrich Hertz erhielten.

Das Biot-Savartsche Gesetz und das Ampèresche Gesetz werden durch folgende Gleichungen verallgemeinert

$$\operatorname{rot} \mathfrak{H} = \frac{4\pi}{c} \mathfrak{j},$$

wobei $\mathfrak{H}$ die magnetische Feldstärke, $\mathfrak{j}$ die Stromdichte darstellt.

Das Gesetz der elektromagnetischen Induktion wird durch folgende Formel dargestellt

$$\operatorname{rot} \mathfrak{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t},$$

wobei $\mathfrak{E}$ die elektrische Feldstärke, $\mathfrak{B}$ die magnetische Induktion des Feldes darstellt.

Maxwells Methode, den mathematischen Abstraktionen der Feldtheorie einen physikalischen Sinn zuzuschreiben, war besonders erfolgreich, als er den Begriff des Stromes verallgemeinerte und den Verschiebungsstrom einführte, der durch den Differentialquotienten der elektrischen Erregung nach der Zeit bestimmt wurde. Dem Verschiebungsstrom kommt die gleiche physikalische Realität zu wie dem Strom in Leitern. Maxwell nahm an, daß Verschiebungsströme ein magnetisches Feld hervorrufen. Dementsprechend wurden in der ersten Maxwellschen Gleichung diese Ströme zu den Strömen in Leitern addiert, und wir erhalten

$$\operatorname{rot} \mathfrak{H} = \frac{4\pi}{c} \mathfrak{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t}.$$

Man muß betonen, daß weder die Faradayschen noch andere damals bekannte Experimente Hinweise für eine solche Schreibweise geben. Gerade diese geniale Vermutung wurde zum Ausgangspunkt der elektromagnetischen Theorie des Lichts, der Wellengleichung und der Vorstellung eines elektromagnetischen Feldes ohne Ladungen.

Die zweite Maxwellsche Gleichung behält mit der Verallgemeinerung des Strombegriffs ihre Form, aber sie beinhaltet nun, daß bei jeglicher Veränderung des magnetischen Feldes ein elektrisches Feld entsteht, ein Verschiebungsstrom in den Dielektrika und ein Leitungsstrom in den Leitern.

Die Methode, die Maxwell zu diesen Beziehungen führte, wird durch die Synthese einer mathematischen Charakteristik jeder physikalischen Größe mit der physikalischen Interpretation des mathematischen Symbols charakterisiert.

Typisches Beispiel der Maxwellschen Methode ist die physikalische Interpretation des Koeffizienten, der die elektromagnetische und die elektrostatische

Einheit der Elektrizität verbindet und zur Genesis der elektromagnetischen Theorie des Lichtes führte.

In seinem Lehrbuch zeigte Maxwell, daß der Quotient der elektromagnetischen und der elektrostatischen Einheit der Elektrizität die Dimension $1/v$ hat und mit der Größe $1/c$ übereinstimmt. Diese Übereinstimmung war schon vor Maxwell bekannt, hat aber erst in Verbindung mit den charakteristischen Zügen der wissenschaftlichen Weltanschauung und der wissenschaftlichen Methode Maxwells zur elektromagnetischen Theorie des Lichtes geführt.

Die grundlegenden Ideen der Elektrodynamik Maxwells ergeben sich aus zwei Prinzipien der klassischen Physik: dem Prinzip der Energieerhaltung und der Nahwirkung. Das Prinzip der Erhaltung der Energie wird für einen bestimmten Kreis von Erscheinungen (Elektrostatik, stationäre und quasistationäre Felder) auch durch das Gleichungssystem der Fernwirkung befriedigt. In der Elektrodynamik der Fernwirkung versteht man unter Energie die Energie der Wechselwirkung von Ladungen und Strömen. In einer Nahwirkungstheorie dagegen ist die Energie im Feld lokalisiert und wird in jedem Bereich durch die Volumendichte bestimmt. Die auf diese Art definierte Energie stimmt für schnell veränderliche Felder nicht mit der durch das Fernwirkungsprinzip erfaßten überein. Somit erweist sich die Elektrodynamik Maxwells als die erste folgerichtige Theorie der Nahwirkung, weil sie aus diesem Prinzip quantitative Beziehungen herleitet, die sich von denen der Fernwirkungstheorie unterscheiden. Sie macht die Realität des Feldes experimentell beweisbar. Zugrunde liegt dabei der „vierdimensionale" Charakter der Nahwirkung. Nahwirkung bedeutet hier, daß die Wirkung des Feldes auf den materiellen Punkt (die Punktladung) nicht durch die augenblickliche Verteilung der Ladungen bestimmt wird (zu dem Moment, da die elektromagnetische Störung die gegebene Ladung erreicht, ist die Verteilung bereits eine andere als in dem Moment, da die Störung entstand), sondern durch den Zustand des Feldes in einem Raumpunkt in dem Moment, da sich die Ladung in ihm befindet. Nahwirkung heißt außerdem, daß die Ladung ihre Energie oder ihren Impuls nicht auf andere Ladungen, sondern auf das Feld überträgt. Dementsprechend sind Energie und Impuls Eigenschaften des Feldes. Nahwirkung im Sinne Descartes' bedeutete, daß der Impuls oder die Energie, die das Teilchen A an einem Ende des absolut harten Stabes erhielt, der A mit einem anderen Punkt B verbindet, in demselben Moment aufgenommen wird, in dem das Teilchen B ihn weitergibt. Es wurde kein Zeitintervall berücksichtigt, währenddessen die Energie oder der Impuls weder A noch B zuzuschreiben ist, sondern dem Stab, der die Rolle des Zwischenmediums spielt. Somit war die Annahme eines solchen Stabes nicht eindeutig mit den Feldgleichungen verbunden.

Nahwirkung durch einen absolut harten Stab bedeutet dreidimensionale Nahwirkung, die in bezug auf die Feldgleichungen der Fernwirkung äquivalent ist. Die Nahwirkung in der klassischen Elektrodynamik ist vierdimensionale Nahwirkung. Sie ist mit der Fernwirkung nicht vereinbar, weil sie die endliche Ausbreitung einer Deformation des Feldes voraussetzt.

Der vierdimensionale Charakter der Nahwirkung ergibt sich unmittelbar aus den Maxwellschen Gleichungen, aus der Wirkungsweise elektromagnetischer Schwin-

gungen, aus der elektromagnetischen Theorie des Lichtes. Von einer unmittelbaren Verbindung voneinander entfernter Punkte ist keine Rede. Die Vorstellung von den elektromagnetischen Wellen hat reinen Differentialcharakter. Das Entstehen des elektrischen Feldes bei einer Veränderung des magnetischen und die Entstehung des magnetischen Feldes bei Veränderung des elektrischen wird durch Differentialgleichungen ausgedrückt, die die Feldlinien verbinden, und breitet sich von Punkt zu Punkt aus. Aber die Veränderungen vollziehen sich entsprechend den Maxwellschen Gleichungen auch von Moment zu Moment. Ein magnetisches Feld entsteht als Funktion des Differentialquotienten des elektrischen Feldes nach der Zeit und umgekehrt. Das Erscheinen eines veränderlichen, von der Zeit abhängigen elektrischen Feldes ruft ein magnetisches Feld hervor, das seinerseits veränderlich und von der Zeit abhängig ist. Aber ein veränderliches magnetisches Feld erzeugt wiederum ein veränderliches elektrisches Feld. Solange also in einem Primärkreis periodische Veränderungen der Stromrichtung vorgenommen werden, solange in einem Punkt periodische Schwingungen des elektrischen Feldes vonstatten gehen, werden sich also elektrische Wellen in alle Richtungen ausbreiten. Periodische Schwingungen in jedem Punkte des Raumes werden wiederum Schwingungen derselben Frequenz in den benachbarten Punkten hervorrufen. Solche Vorstellungen über die elektromagnetischen Wellen, die Maxwell mit dem Licht identifizierte, enthielten bereits im Keime eine radikale Abwendung von der mechanischen Konzeption des Äthers.

5. *Die Elektrodynamik sich bewegender Systeme*

Gleichzeitig mit der Begründung der klassischen Elektrodynamik entstand die Vorstellung von der Lokalisation der Energie im Raum. In den Jahren 1873—1874 bestimmte N. A. Umov die Energiedichte in einem beliebigen Punkte des Mediums als Quotienten der Energiemenge, die in einem unendlich kleinen Volumenelement enthalten ist, und des Elementes.[22] Er führte den Begriff Flußdichte der Energie als Produkt der Energiedichte und der Geschwindigkeit ein. 1884 ging Poynting vom Prinzip der Lokalisation der Energie aus und entwickelte analoge Vorstellungen für die Energie eines elektromagnetischen Feldes.[23]

Aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie folgt, daß sich die elektromagnetische Energie, die in einem bestimmten Abschnitt eines ruhenden homogenen Feldes konzentriert ist, nur in dem Falle vergrößern oder verringern kann, wenn sie sich innerhalb dieses Abschnittes in andere Formen umwandelt, wenn sie aus dem umgebenden Raume kommt oder an ihn abgegeben wird. Wird das Prinzip der Energieerhaltung durch das Prinzip der Nahwirkung ergänzt, so kann die elektromagnetische Energie nur durch die Oberfläche in das Innere eines bestimmten Volumenabschnittes eindringen. Somit hängt das Gleichgewicht der

[22] Н. А. Умов. Избранные сочинения, М., Л., 1950, S. 153.
[23] J. H. Poynting, Transfer of energy in the electromagnetic field, in: Phil. Trans. 175, 1884, S. 343.

Energie von dem Energiefluß durch die Oberfläche des betrachteten Raumelements ab, wobei der elektromagnetische Energiefluß in jedem Punkte durch die Größe der elektrischen und magnetischen Feldstärke bestimmt wird. Dieser Energiefluß ist gleich dem Vektorprodukt der beiden genannten Größen.

Im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts wurde die fundamentale Bedeutung des Prinzips der Lokalisation der Energie immer offensichtlicher. Es begann eine historisch neuartige Rolle zu spielen, die es bei Maxwell noch nicht haben konnte.[24]

Planck, der das Prinzip der Erhaltung der Energie als wichtigstes Prinzip ansah, das die gesamte Physik verallgemeinerte, nennt es eine Brücke, die von der Mechanik zur Elektrodynamik führt.[25] Historisch war das wirklich der Fall. Die Elektrodynamik Maxwells stützte sich auf die Begriffe der analytischen Mechanik, wobei diese Begriffe einen neuen Inhalt erhielten. Maxwell füllte Schritt für Schritt die Schemata von Lagrange mit diesem neuen physikalischen Inhalt. Aber in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts begann, wenn man das so ausdrücken darf, der Gegenverkehr auf der Brücke, die Mechanik und Elektrodynamik miteinander verband. Die Begriffe, die aus der Elektrodynamik erwuchsen, griffen auf die Mechanik über. Hierbei spielte der experimentelle Beweis des Lichtdruckes durch P. N. Lebedev eine historische Rolle.[26] Dieser Entdeckung folgte eine Reihe von Arbeiten, in denen nach und nach die Begriffe Impuls und Masse der elektromagnetischen Wellen herausgearbeitet wurden. Entsprechende Begriffe und Ideen kennzeichneten die allmähliche Unterordnung der Mechanik unter die allgemeineren Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen und führten zu einem neuen physikalischen Weltbild.

Die wichtigste Verallgemeinerung der theoretischen Physik in den neunziger Jahren war die Theorie von Hendrik Antoon Lorentz.[27]

Lorentz gab eine wesentliche Voraussetzung Maxwells auf. Entsprechend der Maxwellschen Theorie verlaufen die elektrodynamischen Prozesse in einem bewegten System so, als befände es sich in Ruhe. Die Bewegung des Systems hat keine Auswirkungen auf die in ihm vor sich gehenden elektrodynamischen Prozesse und kann deshalb in diesen Prozessen auch nicht nachgewiesen werden. Der Maxwellsche Relativismus wurde mit Hilfe der Vorstellung über die Mitführung des Äthers durch das sich bewegende System interpretiert. In der Theorie von Lorentz wird dem Äther absolute Ruhe zugeschrieben. Er ist ein den Raum erfüllendes Medium, in dem sich die Atome bewegen. Die Atome bestehen aus elektrischen Elementarladungen. Letztere können auch als freie Elektronen unabhängig von den Atomen bestehen. Somit verliert der Strom in Leitern seine selbständige Realität, ihm liegt ein Konvektionsstrom zugrunde, die Bewegung der Ionen in Elektrolyten, der Elektronen in Metallen. In der Theorie von Lorentz charakterisieren nicht mehr Dielektrizitätskonstante und Permeabilität primär

[24] Vgl. M. Planck, Einführung in die theoretische Physik, Bd. 3, Leipzig 1922, S. 8–24.

[25] Ebenda, S. 1.

[26] P. Lebedew, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, in: Ann. Phys. 6, 1901, S. 433–458.

[27] H. A. Lorentz, Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, Leiden 1895.

das Medium. Sie werden auf die dielektrische Polarisation und die Molekularströme zurückgeführt. Deshalb betrachtet Lorentz die Größe ε und μ als statistische Mittel einer großen Zahl elektrischer und magnetischer Dipolmomente.

In diesem Sinne kehrt die Theorie von Lorentz von der rein kontinuierlichen Vorstellung, die sich aus den Gleichungen Maxwells ergab, zu einer atomistischen Vorstellung zurück. Sie zerfällt wie in der Thermodynamik in eine makroskopisch kontinuierliche und in eine mikroskopisch diskrete Vorstellung. Beide sind nur durch die statistischen Begriffe der Wahrscheinlichkeit und der Mittelwerte verbunden. Weiter ist die Analogie allerdings nicht anwendbar. Sie wird in der Folge durch die unzulänglichen Vorstellungen über die korpuskulare mikroskopische Struktur der Elektronen begrenzt. Die Notwendigkeit, auch das Wellenkontinuum in der Elektronentheorie zu berücksichtigen, wurde erst in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts nachgewiesen. Aber Lorentz neigte bereits zu einer Auffassung des Elektrons als einer Deformation des Äthers.

Ausgehend von Vorstellungen über Ladungen, die sich im ruhenden Äther bewegen, wurde die Elektrodynamik bewegter Medien geschaffen. Sie kann als Elektrodynamik sich langsam bewegender Medien bezeichnet werden. Sie wird unzureichend, wenn die Bewegung der Körper so schnell wird, daß man das Quadrat des Quotienten von Geschwindigkeit der Körper und Lichtgeschwindigkeit nicht mehr vernachlässigen kann. Für den Fall, daß die Geschwindigkeit im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit gering ist, stellt die Lorentzsche Elektrodynamik eine hinreichend genaue Annäherung dar und erfordert keine sich aus der Relativitätstheorie ergebenden Korrekturen.

Die Lorentzsche Elektrodynamik sich bewegender Medien führte zur Krisis der Lorentzschen Elektrodynamik. Aus ihr ergab sich eine unterschiedliche Geschwindigkeit der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen für Körper, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Verhältnis zum Äther bewegen. Diese Schwierigkeit verschwand nach der Verallgemeinerung der klassischen Physik, die 1905 durch Einstein erfolgte. Die Relativitätstheorie nimmt an, daß nicht nur die Lorentzschen Gleichungen der Elektrodynamik, sondern auch die Gleichungen der Dynamik beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen invariant sind. Aber ein solcher Übergang wird nicht durch die Galileitransformation, sondern durch die Lorentztransformation beschrieben.

VIII. RELATIVITÄT

1. Das elektromagnetische Weltbild

Das naturwissenschaftliche Weltbild des 20. Jahrhunderts unterscheidet sich stärker von den klassischen Vorstellungen des 19. Jahrhunderts als diese von den mechanischen Auffassungen der Naturwissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts. Anfangs schien es, als reduziere sich alles auf den Übergang von einem mechanischen zu einem elektromagnetischen Weltbild. Im folgenden ergab sich jedoch, daß dieses neue Weltbild komplizierter war. Die Konzeptionen, die ursprünglich auf der Grundlage der Elektrodynamik formuliert worden waren, offenbarten später einen allgemeineren Sinn, insofern sie sich aus höchst allgemeinen Vorstellungen über Raum, Zeit, Bewegung und Stoff ableiten ließen. Diese Entwicklung ist äußerst charakteristisch für die Physik des 20. Jahrhunderts, vornehmlich für die Genesis der Relativitäts- und der Quantentheorie.

Ausgangspunkt der Ideen von der Relativität und den Quanten (genauer gesagt, der Ideen, die zu den relativistischen und Quantenvorstellungen geführt haben) war die Entwicklung der Elektrodynamik. Sie führte zunächst zu dem Gedanken, alle Naturerscheinungen letzlich durch elektromagnetische Initial- und Fundamentalprozesse zu erklären. Die elektrischen Ladungen erschienen als die Grundbausteine des Weltgebäudes, und die elektrischen Felder als diejenigen primären Wechselwirkungen der stofflichen Elemente, aus denen sich die anderen, darunter die spezifisch mechanischen Wechselwirkungen zusammensetzten. Doch dieser Entwurf erwies sich (hier sei an die oft zitierte Bemerkung Bohrs erinnert) als nicht genügend „verrückt". Teilchen und Wechselwirkungen des mechanischen Weltbildes durch andere, ihrer Natur nach elementarere Teilchen und Wechselwirkungen zu ersetzen erwies sich als unzureichend.

Das Embryonalstadium des elektromagnetischen Weltbildes (es ist aus diesem Embryonalzustand nicht herausgekommen) behielt die der klassischen Physik eigene Entgegensetzung von kontinuierlichem Medium und diskretem Stoff bei. Dabei agierten als Medium entweder der kontinuierliche Äther oder die gleichfalls kontinuierlichen dynamischen Wechselwirkungen, die sich im unbegrenzten leeren Raum ausbreiteten. Es gab zwar Konzeptionen, die aus dem kontinuierlichen Medium die Existenz diskreter Teilchen ableiteten, doch sie bestimmten nicht die klassische Vorstellung von der Natur. Das Ideal der klassischen Wissenschaft war ein Weltbild, in dem es nichts gab außer Bewegungen und Wechselwirkungen diskreter Massen.

In den zahlreichen Entwürfen zu einem elektromagnetischen Weltbild um die Jahrhundertwende wurde dieses Ideal im allgemeinen aufrechterhalten, nur begann man nun die Masse als abhängig von den elektromagnetischen Wechselwirkungen der Teilchen anzusehen. Doch dies war nur der Beginn der Entwicklung. Bald danach erklärte die Relativitätstheorie mit Hilfe neuer, fundamentaler Postulate für Raum und Zeit die paradoxen Resultate gewisser Experimente, welche sich auf elektrodynamische Prozesse in einem kontinuierlichen Medium bezogen.

Ausgangspunkt für dieses Umdenken war jedoch die Vorstellung von der elektromagnetischen Natur der Wechselwirkungen zwischen Körpern und von den elektrischen Ladungen als den Grundbausteinen des Weltgebäudes.

Im Jahre 1881 hatte Helmholtz in einer Faraday gewidmeten Rede die Faradayschen Elektrolysegesetze mittels der Vorstellung unteilbarer Teilchen negativer Ladung erklärt. Wenn jedes Atom des Stoffes, der an einer elektrolytischen Reaktion teilnimmt, eine nicht weiter teilbare elektrische Ladung trägt, dann erhält man eine Proportionalität zwischen der Elektrizitätsmenge und der Menge des bei der Elektrolyse abgeschiedenen Stoffes. J. Stoney bezeichnete damals die Elektronen als elementare Ladungen. Bis zum Ende des Jahrhunderts hatten breite und systematische Untersuchungen über den Durchgang von Elektrizität durch verdünnte Gase die Entdeckungen vorbereitet, die die Lehre von der Elektrizität gründlichst verändern und die Vorstellung vom Elektron in ihren Mittelpunkt rücken sollten. Aus den Arbeiten J. J. Thomsons und anderer ergab sich, daß die schon in den fünfziger Jahren entdeckten Kathodenstrahlen durch magnetische und elektrische Felder, die senkrecht zur Strahlenrichtung verlaufen, sowie durch negativ geladene Körper abgelenkt werden. Man nahm daraufhin an, daß die Kathodenstrahlen einen Strom diskreter Elektrizitätsteilchen darstellen. Später gelang es nicht nur, diese Annahme zu beweisen, sondern auch Masse und Ladung dieser Teilchen zu bestimmen. Jedes dieser Teilchen wiegt etwa 1840 mal weniger als ein Wasserstoffatom, und seine Ladung beträgt $4{,}77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten.

In den neunziger Jahren reduzierten sich die Vorstellungen über die Atome und Elektronen auf folgendes: Die positive elektrische Ladung ist gleichmäßig über das ganze Atomvolumen verteilt (J. J. Thomson). Zudem enthält das Atom eine Anzahl Elektronen, welche die positive Ladung kompensieren. In den Dielektrika lösen sich die Elektronen nicht von den Atomen, sondern verschieben sich in ihnen nur ein wenig, wenn das Atom in ein elektrisches Feld gerät.

Im Gegensatz dazu verlieren oder erwerben die Atome in Elektrolyten und leitenden Gasen eine Anzahl von Elektronen. Diese Atome werden dadurch zu Ionen, also zu geladenen Atomen, und bewegen sich im elektrischen Feld. In Metallen bewegen sich die Elektronen unabhängig von den Atomen. Die Vorstellung von der Diskretheit der elektrischen Ladungen und von ihrer Bindung an die Struktur des Stoffes war der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Atomphysik.

Für die Genesis der Relativitätstheorie hatte ein anderes Problem vorrangige Bedeutung: die Wechselwirkung des Elektrons mit dem Äther. Im vorangegangenen

Kapitel ist darauf hingewiesen worden, daß Lorentz den Äther für ein absolut ruhendes Medium hielt. In ihm bewegen sich die Elektronen; der elektrische Strom sei nichts als Elektronenbewegung. Die elektrischen und magnetischen Kräfte wirken nur auf Ladungen, der Äther wird durch nichts beeinflußt, er bleibt unbewegt, und jeglicher elektrische Strom ist im Grunde ein Konvektionsstrom. Darum verlieren die Dielektrizitätskonstante und die magnetische Permeabilität den Sinn, den sie in Maxwells Elektrodynamik hatten. Denn nun erweist sich das Medium, in dem die elektrischen Kräfte wirken, das Medium, für welches die Dielektrizitätskonstante und die magnetische Permeabilität die Ausgangs- und Primärbegriffe waren, als eine Ansammlung von im Äther schwimmenden einzelnen Ladungen. Für den Äther sind ε und μ gleichberechtigte Einheiten, für einzelne Elektronen haben diese Größen keinen Sinn, und nur für große Ansammlungen von Elektronen behalten sie als statistische Mittelwerte einer großen Zahl elektrischer und magnetischer Dipolmomente eine Bedeutung.

In Abhängigkeit von diesen Primärerscheinungen, also den Translations- oder Kreisbewegungen der Elektronen, haben die aus Elementarladungen bestehenden Körper diese oder jene Dielektrizitätskonstante oder magnetische Permeabilität. Außerdem haben die Körper eine bestimmte Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit ist ebenfalls kein primärer, sondern ein abgeleiteter Begriff: Sie ist verbunden mit der makroskopischen mittleren freien Weglänge der Elektronen.

Die Vorstellung eines ruhenden Äthers, in dem diskrete Materieteilchen, die elektrischen Elementarladungen, schwimmen, erlaubte, eine Vielzahl elektrischer und optischer Erscheinungen zu erklären. Lorentz ging hinsichtlich der Behauptung der Unbewegtheit des Äthers beträchtlich weiter als Fresnel. Er verzichtete vollständig auf jegliche Mitnahme des Äthers durch bewegte Körper. Aus der Lorentzschen Theorie ergibt sich, daß die Bewegung der Körper im Äther keinerlei merkliche Veränderungen irgendwelcher elektrischer oder optischer Prozesse hervorruft, daß die Veränderungen dieser Prozesse nicht proportional dem Quotienten v/c, d. h. Körpergeschwindigkeit durch Lichtgeschwindigkeit, sind, sondern proportional zum Quadrat dieses Quotienten, also v^2/c^2. Folglich könnte ein Ätherwind nur durch sehr verfeinerte Experimente entdeckt werden. Außer diesen elektrischen und optischen Prozessen, die von v^2/c^2 abhängen, läßt die Theorie von Lorentz keine Möglichkeit zu, Bewegung von Ladungen relativ zum Äther auszumachen. Der Verlauf der Erscheinungen wird gemäß dieser Theorie durch relative Verschiebungen der Ladungen, durch Abstandsänderungen zwischen den Körpern bestimmt.

So kann die Vorstellung vom Äther als absolutem Bezugskörper an Stelle des Newtonschen absoluten leeren Raumes unter bestimmten Bedingungen, nämlich bei Beschränkung auf solche Erscheinungen, die von v/c abhängen, mit dem elektrodynamischen Relativismus verträglich sein, mit der Anerkennung, daß Bewegung relativ gegen den Äther bei optischen und allgemein elektromagnetischen Messungen von Größen erster Ordnung nicht entdeckt werden kann. Einen elektrodynamischen Relativismus zweiter Ordnung schloß die Theorie von Lorentz aus: Messungen von elektrodynamischen Größen, die von v^2/c^2 abhängen, mußten eine absolute Bewegung aufdecken, eine Bewegung der Körper relativ zum unbewegten Äther.

In unserer Thematik vorgreifend, vermerken wir hier, daß derartige Messungen ein negatives Resultat erbrachten und daß sich darum in der Elektrodynamik die Vorstellung von einer Relativität verfestigte, die schon nicht mehr auf Größen erster Ordnung beschränkt war. Hierzu aber mußte man die Grundlagen der klassischen Mechanik verändern. Der Boden für einen solchen Umschwung war in gewissem Maße vorbereitet durch die Entwicklung des elektromagnetischen Weltbildes und besonders durch die Versuche, eine elektrodynamische Interpretation der Grundbegriffe, vor allem des Massebegriffes, zu geben.

Die Elektronentheorie eröffnete eine neue Periode in der Entwicklung der Vorstellungen über die elektromagnetische Masse. Es tauchte der äußerst kühne Gedanke auf, daß möglicherweise die gesamte Masse der elementaren Stoffteilchen, der Elektronen, auf ihre elektromagnetische Masse zurückgeführt werden könnte.

Schon 1881 hatte J. J. Thomson angenommen, daß die Trägheit des elektromagnetischen Feldes sich zur Trägheit des Körpers addiere und daß darum ein geladener Körper eine größere Masse besitze als ein ungeladener. Die Differenz zwischen geladenem und ungeladenem Körper nannte Thomson „scheinbaren Massenzuwachs“. Im weiteren erhielt sie die Bezeichnung elektromagnetische Masse.

Die Auffassung, die gesamte Elektronenmasse sei elektromagnetische Masse, entsprach im allgemeinen dem damaligen Wissen um Ladung, Abmessung und Masse des Elektrons. Im folgenden bekam dieser Gedanke eine noch größere Berechtigung. Experimentelle Daten über das Verhältnis von Ladung zu Masse des Elektrons erhielt man beim Studium der Ablenkung von Kathodenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern. Ebenso studierte man die β-Strahlen des Radiums, also Elektronen, die sich mit ungeheurer Geschwindigkeit, vergleichbar der des Lichtes, bewegen. Es erwies sich, daß das Verhältnis von Ladung zu Masse des Elektrons von der Geschwindigkeit abhängt. Die Ladung ändert sich nicht, also ändert sich die Masse des Elektrons. Dies wäre leicht verständlich, wenn die Masse des Elektrons elektromagnetischer Natur wäre.

Um eine quantitative Vorstellung von der Abhängigkeit der elektromagnetischen Masse von der Geschwindigkeit zu bekommen, muß man die Ladungsverteilung im Elektron kennen. Abraham nahm 1903 ein festes, kugelförmiges Elektron an, in dem die Ladung gleichmäßig entweder im Volumen oder auf der Oberfläche verteilt ist. Er errechnete die sich aus dieser Annahme ergebende Abhängigkeit der Elektronenmasse von der Geschwindigkeit, und die Resultate lagen den experimentellen Daten nahe. Bald erschienen Hypothesen, wonach nicht nur die Gesamtmasse der Elektronen elektromagnetischer Natur sei, sondern auch die der Atome und allgemein aller Naturkörper. Damit zeichnete sich der Übergang zum elektromagnetischen Weltbild ab.

Die philosophischen Schlußfolgerungen aus der beginnenden Revolution in der Physik zog W. I. Lenin in seinem Buch „Materialismus und Empiriokritizismus“. Lenin unterstrich den charakteristischen Gedanken, daß die klassische Mechanik das Abbild der langsamen realen Bewegungen war, während die neue Physik ein Abbild ungleich schnellerer realer Bewegungen darstellt.[1] Die Gesetze der

[1] W. I. Lenin, Materialismus und Empiriokritizismus, in: W. I. Lenin, Werke, Bd. 14, Berlin 1962, S. 265.

Mechanik erweisen sich als Spezialfälle der allgemeineren elektrodynamischen Gesetze.[2] Lenin sprach vom wirklichen philosophischen Sinn dieser physikalischen Verallgemeinerungen. Je entscheidender und kühner die Wissenschaft auf eine neue Stufe in ihrer Widerspiegelung der objektiven Realität übergeht, je ungewöhnlicher die neuen Vorstellungen im Vergleich zu den alten sind, um so fruchtbarer für den wissenschaftlichen Fortschritt werden die philosophischen Ideen des Marxismus. Sie basieren auf der sich entwickelnden Wissenschaft, sie geben keine apriorischen, dogmatischen Hinweise und keine endgültigen Antworten auf die Frage, wie die konkreten physikalischen Vorstellungen von der Materie beschaffen sein müssen; sie behaupten ihre objektive Realität und Erkennbarkeit, und sie überlassen der Wissenschaft, auf Grund experimenteller Daten in lebendiger Verflechtung sich ablösender, ergänzender, konkretisierender und verallgemeinernder physikalischer Konzeptionen die objektive Realität immer genauer widerzuspiegeln.

Eine solche antidogmatische Position kann natürlich nicht ins Schwanken gebracht werden durch wissenschaftlichen Fortschritt, durch Vertiefung des physikalischen Wissens und durch Aufklärung der Relativität und Begrenztheit von Begriffen, die früher absolut und unveränderlich erschienen. „Denn die *einzige* ‚Eigenschaft‘ der Materie, an deren Anerkennung der philosophische Materialismus gebunden ist, ist die Eigenschaft, *objektive Realität* zu *sein*, außerhalb unseres Bewußtseins zu existieren.“[3]

Diese These steht auch jeglicher dogmatischer Identifizierung des Materialismus mit bestimmten, historisch vergänglichen, weiterer Präzisierung, Konkretisierung und Verallgemeinerung unterliegenden physikalischen Vorstellungen von der Materie entgegen. Eine derartige antidogmatische Position kann nicht veralten. Die Entwicklung der physikalischen Ideen stärkt sie, und sie selbst stimuliert diese Entwicklung. Von dieser Position aus sah Lenin nicht nur die Genesis des elektromagnetischen Weltbildes, sondern auch den weiteren Übergang zu immer komplizierteren Vorstellungen. Lenin schrieb, daß der Materialismus nicht „unbedingt ein ‚mechanisches‘, nicht aber ein elektromagnetisches noch ein anderes, noch ungleich kompliziertes Weltbild als das der *sich bewegenden Materie* behaupte“[4]. Die weitere Entwicklung der Physik hat gezeigt, daß die naturwissenschaftliche Revolution tatsächlich zum Aufbau eines solchen Weltbildes führt, das ungleich komplizierter ist als das elektromagnetische. Geht man von der *Entwicklung* der Wissenschaft aus, so wird man apriorische Schemata grundsätzlich verwerfen. Man wird auf metaphysische Verabsolutierungen dieser oder jener physikalischen Theorie verzichten und statt dessen in der Wissenschaft einen Prozeß kontinuierlicher Annäherung an die Wahrheit sehen. Eine solche Verallgemeinerung eröffnet der Wissenschaft wirkliche Perspektiven und wird zur aktiven Triebkraft des wissenschaftlichen Fortschrittes.

Die Newtonsche Mechanik mit ihrem absoluten, leeren Raum, das Lorentzsche Bild des unbewegten Äthers, die Relativitätstheorie Einsteins — sie alle haben

[2] Ebenda, S. 261.
[3] Ebenda, S. 260.
[4] Ebenda, S. 281.

mit wachsender Vollständigkeit und Genauigkeit die objektive materielle Welt dargestellt. Der Übergang von einem wissenschaftlichen Weltbild zum nächsten erfolgte deshalb, weil das erstere aufgehört hatte, der Gesamtheit der experimentell festgestellten Fakten zu entsprechen.

2. Die Weltanschauung Albert Einsteins

Die Relativitätstheorie Einsteins darf nicht nur als Resultat von Bemühungen angesehen werden, aus dem wissenschaftlichen Weltbild rein anthropomorphe Elemente auszuschließen und sich rein spontan darauf vorzubereiten, einen Anschlag auf die traditionellen Vorstellungen zu verüben. Für Einsteins Theorie ist vielmehr die Verbindung ungewöhnlich paradoxer Ausgangsbehauptungen mit deren objektiver Glaubwürdigkeit charakteristisch. Gerade dieser Eindruck, daß das Sein selbst paradox sei, nicht aber diese oder jene Denkkonstruktion, erweckte für diese Theorie in breiten Kreisen Interesse. Es handelte sich dabei um eine radikale Revision der Grundbegriffe, denn die Theorie Einsteins unterschied sich von anderen Versuchen, die neuen Experimente zu interpretieren, gerade durch ihren systematischen Charakter. In ihr waren nicht spezielle Hypothesen ad hoc aufgestellt, sondern alles ergab sich aus fundamentalen und höchst natürlichen Postulaten, die sich auf Raum, Zeit und Bewegung beziehen. Eine derartige Theorie forderte von ihrem Schöpfer äußerst genaue erkenntnistheoretische Ausgangsvorstellungen über die Natur der wissenschaftlichen Kenntnisse und die Beziehungen zwischen den logischen und experimentellen Wegen in der Wissenschaft.

Für Einstein sind wissenschaftliche Kenntnisse eine Darstellung der Wirklichkeit, eine Darstellung der objektiven Harmonie des Seins, der objektiven Ratio, die das ganze Universum umfaßt und sich in den Kausalbindungen zwischen allen Naturprozessen dartut. Das spinozistische causa sive ratio, ratio sive causa (Ursache oder Vernunft, Vernunft oder Ursache) entsprach weitgehend seiner Ausgangsvorstellung über Welt und Wissenschaft.

Für Einstein ist wissenschaftliche Wahrheit das, was dem Sein entspricht, unabhängig vom Erkenntnisvorgang. „Der Glaube an eine vom wahrnehmenden Subjekt unabhängige Außenwelt liegt aller Naturwissenschaft zugrunde", schrieb Einstein.[5]

Trotz der jahrelangen eifrigen Studien der Werke Humes sah Einstein letzten Endes in den Ansichten des englischen Philosophen den Anfang des Positivismus, der Ende des 19. Jahrhunderts in der Person Machs die Aufgabe der Wissenschaft auf eine phänomenologische Beschreibung der Beobachtungen beschränken wollte. In einem Artikel über die Philosophie Bertrand Russells, geschrieben für den V. Band der „Library of Living Philosophers", welcher Russell gewidmet ist, sagt Einstein, daß Hume „... ihr (der Philosophie — *die Übers.*) auch ... zur

[5] A. Einstein, Maxwells Einfluß auf die Entwicklung der Auffassung des Physikalisch-Realen, in: A. Einstein, mein Weltbild, hrsg. v. C. Seelig, Berlin (West) 1957, S. 159.

Gefahr geworden, indem durch diese Kritik eine verhängnisvolle ‚Angst vor der Metaphysik' ins Leben trat, die eine Krankheit des gegenwärtigen empiristischen Philosophierens bedeutet; diese Krankheit ist das Gegenstück zu jenem früheren Wolken-Philosophieren, welches das Sinnlich-Gegebene entbehren und vernachlässigen zu können glaubte."[6]

Die phänomenologische Tradition der positivistischen Philosophie erklärte alles, was sich außerhalb der Grenzen der „Erfahrung" im Sinne der Empfindungen des Menschen befindet, alles, was als objektive Ursache der Empfindungen dient, als „Metaphysik". Dementsprechend forderten die Positivisten, aus der Wissenschaft alle Begriffe zu beseitigen, die über die „reine Beschreibung" hinausgehen. „Denn dieser Anspruch", schreibt Einstein im gleichen Artikel, „— wenn er nur völlig konsequent durchgeführt wird — schließt überhaupt jedes Denken als ‚metaphysisch' aus. Damit Denken nicht in ‚Metaphysik' bzw. in leeres Gerede ausarte, ist es nur notwendig, daß genügend viele Sätze des Begriffssystems mit Sinnenerlebnissen hinreichend sicher verbunden seien."[7]

Unter „früherem ... Philosophieren, welches das Sinnlich-Gegebene entbehren und vernachlässigen zu können glaubte" verstand Einstein die platonische Tradition, die Kantsche Konzeption der apriorischen Erkenntnisformen und den Konventionalismus — die Vorstellung von den wissenschaftlichen Wahrheiten als bedingten Übereinkünften.

Einsteins Beziehung zu Mach kann eindeutig und auf einfache Art bestimmt werden, wenn man die endgültigen Einschätzungen und die wirklichen philosophischen Ideen ins Auge faßt, die bei den Bemühungen um die neue physikalische Theorie tatsächlich wirksam waren. Diese Beziehungen waren negativ. Historisch-biographisch gesehen war die Frage etwas schwieriger: Die Einschätzungen änderten sich; anfänglich teilte Einstein Machs Ideen, später trat er gegen sie auf. In seiner Autobiographie von 1949 schreibt Einstein über die Kritik der Newtonschen Konzeption des absoluten Raumes in Machs „Mechanik in ihrer Entwicklung" und fügt hinzu: „... in meinen jungen Jahren hat mich aber auch Machs erkenntnistheoretische Einstellung sehr beeindruckt, die mir heute als im Wesentlichen unhaltbar erscheint."[8]

Die Entwicklung seiner Einstellungen zu den Machschen Ansichten verflocht und verband sich eng mit der Ausarbeitung der Relativitätstheorie. Die endgültige Einschätzung wurde in sehr scharfer Form 1920 ausgesprochen. Nach einem Vortrag auf einer Sitzung der Französischen Philosophischen Gesellschaft in Paris antwortete Einstein auf die Frage Meyersons nach seiner Beziehung zu Mach, daß er Mach für einen „erbärmlichen Philosophen" halte.[9]

Der Protest gegen die phänomenologische „reine Beschreibung" und gegen alle Formen des Apriorismus und Konventionalismus entsprach einem positiven

[6] A. Einstein, Bertrand Russell und das philosophische Denken, in: A. Einstein, mein Weltbild, a. a. O., S. 39.

[7] Ebenda.

[8] A. Einstein, Autobiographisches, in: Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, hrsg. v. P. A. Schilpp, Stuttgart 1956, S. 8.

[9] E. Meyerson, La déduction relativiste, Paris 1925, p. 62.

Programm Einsteins. Die Erkenntnis kann über die Grenzen der Empfindung hinausdringen und ein adäquates Bild ihrer Ursachen konstruieren, ein Bild der von der Erkenntnis unabhängigen äußeren Welt. Kommt die Erkenntnis zu Schlüssen, die nicht unmittelbar in Beobachtungen enthalten sind, und werden diese Schlüsse nachher durch neue Beobachtungen bestätigt, so bedeutet dies, daß die Erkenntnis nicht auf die Sphäre der Erscheinungen beschränkt ist und objektive Wahrheit findet. Solche Tatsachen aus der Wissenschaftsgeschichte wie die Entdeckung des Planeten Neptun, dessen Existenz sich nicht phänomenologisch aus Beobachtungen ergab, dienen Einstein als Argument gegen Berkeleys esse = percipi.[10]

Von beobachtbaren Erscheinungen zu nicht unmittelbar aus ihnen entspringenden Schlüssen und danach zur Überprüfung dieser Schlüsse durch neue Beobachtungen — das ist nach Einsteins Meinung der grundsätzliche Weg wissenschaftlichen Erkennens. Nur im Zusammenhang mit dieser Konzeption kann man seine mannigfachen Äußerungen über die „freie Tätigkeit des Bewußtseins" und die notwendige Bindung der wissenschaftlichen Begriffe an eine prinzipiell mögliche experimentelle Prüfung richtig verstehen. Zuweilen hat man in den erkenntnistheoretischen Exkursen Einsteins in der Ausarbeitung und Darlegung der Relativitätstheorie etwas der „reinen Beschreibung" Nahestehendes gesehen. Einstein forderte nämlich, daß man Begriffen nur dann einen physikalischen Sinn zuschreiben könne, wenn man sie im Prinzip mit Beobachtungsresultaten konfrontieren kann. „Bewegung in bezug auf den Äther" erfüllte diese Forderung beispielsweise nicht. Dagegen näherte sich der späte Einstein in seiner Polemik gegen die Vorstellung, die Fundamentalgesetze der Welt seien statistische Gesetze, apriorische Vorstellungen, die die Resultate des Experimentes ignorierten. In Wirklichkeit war die Forderung nach physikalischem Gehalt für mathematische Abstraktionen eine Weiterentwicklung der Maxwellschen Methode, die im Kapitel über das Nahwirkungsprinzip behandelt worden ist. Erkenntnistheoretisch gesehen schloß diese Forderung die rein logische Ableitung physikalischer Konstanten aus „apriorischen Formen des Verstandes" oder aus „bedingten Übereinkünften" aus. Die „freie Schöpfung des menschlichen Geistes" bedeutet bei Einstein nur das eine: Freiheit von phänomenologischer Beschränktheit. Der wirkliche Sinn der Erklärungen Einsteins über die Verbindung mit dem Experiment („physikalischer Gehalt") und über die „freie Schöpfung des menschlichen Geistes" kann nur in ihrem gegenseitigen Zusammenhang verstanden werden. Dabei kann die offensichtliche Zweideutigkeit der Terminologie das Begreifen des wirklichen Sinnes der erkenntnistheoretischen Positionen Einsteins stören; dieser Sinn zeigt sich in dem fundamentalen schöpferischen Denkakt der Schaffung der Relativitätstheorie. Dies wird an den von Einstein vorgetragenen Kriterien für die Wahl einer wissenschaftlichen Theorie erkennbar.

Der physikalische Inhalt einer wissenschaftlichen Theorie wird durch ihre Übereinstimmung mit dem Experiment garantiert. „So einleuchtend diese Forderung zunächst erscheint, so subtil gestaltet sich ihre Anwendung. Man kann näm-

[10] A. Einstein, Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten, in: Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, a. a. O., S. 504.

lich häufig, vielleicht sogar immer, an einer allgemeinen theoretischen Grundlage festhalten, indem man durch künstliche zusätzliche Annahmen ihre Anpassung an die Tatsachen möglich macht. Jedenfalls aber hat es dieser erste Gesichtspunkt mit der Bewährung der theoretischen Grundlage an einem vorliegenden Erfahrungsmaterial zu tun."[11] Außer einer solchen „äußeren Bewährung" entwickelte Einstein ein zweites Kriterium — die Natürlichkeit der Theorie, eine minimale Anzahl von Annahmen, die speziell gemacht werden, um bestimmte Einzelfakten zu erklären. Von den allgemeinen Prinzipien aus gesehen, die einem Weltbild zugrunde liegen, sind solche Annahmen willkürlich. „Der zweite Gesichtspunkt kann kurz als der die ‚innere Vollkommenheit' der Theorie betreffende bezeichnet werden, während der erste Gesichtspunkt sich auf die ‚äußere Bewährung' bezieht. Zur ‚inneren Vollkommenheit' einer Theorie rechne ich auch folgendes: wir schätzen eine Theorie höher, wenn sie nicht eine vom logischen Standpunkt willkürliche Wahl unter an sich gleichwertigen und analog gebauten Theorien ist."[12]

Wir sehen nunmehr, daß die klassische Physik um das Jahr 1900 keine „äußere Bewährung" besaß. Elektrodynamik und Optik hatten zu einem Resultat geführt, das mit den Grundlagen der klassischen Physik unvereinbar war. Allerdings existierten Theorien, die diesen Resultaten eine klassische Interpretation gaben, aber sie besaßen keine „innere Vollkommenheit".

Das angeführte Kriterium ergab sich aus Einsteins Glauben an eine universale Harmonie des Weltbaues, an die Existenz eines universellen Zusammenhanges zwischen allen Naturprozessen. Die Weltharmonie drückt sich im Kausalzusammenhang aus, welcher nie und nirgends abreißt. Darum darf es im Idealfall im Weltbild keine ohne weitere Begründung eingeführten empirischen Konstanten geben. Jede Konstante ergibt sich vielmehr aus bestimmten theoretischen Vorstellungen. 1949 schrieb Einstein über die physikalischen Konstanten: „Bezüglich dieser möchte ich einen Satz aussprechen, der vorläufig auf nichts anderes gegründet werden kann als auf ein Vertrauen in die Einfachheit, bzw. Verständlichkeit, der Natur: derartige *willkürliche* Konstante gibt es nicht; d. h. die Natur ist so beschaffen, daß man für sie logisch derart stark determinierte Gesetze aufstellen kann, daß in diesen Gesetzen nur rational völlig bestimmte Konstante auftreten (also nicht Konstante, deren Zahlwerte verändert werden könnten, ohne die Theorie zu zerstören)."[13]

Im Kapitel I dieses Buches ist der Versuch Keplers erwähnt, die Radien der Planetenbahnen als empirische Konstanten aus einem bestimmten logischen Schema zu bestimmen, aus den Beziehungen zwischen den Radien der den regulären Vielecken ein- und umgeschriebenen Sphären. Aber auch heute, also 300 Jahre später, sind die Konstanten aus dem Weltbild nicht eliminiert. Die aus allgemeineren Annahmen abgeleiteten Konstanten sind ein Ideal geblieben, dem sich anzunähern ein heuristisches Prinzip der Wissenschaft ist.

[11] Ebenda, S. 8.
[12] Ebenda, S. 8—9.
[13] Ebenda, S. 23.

Ein ebensolches heuristisches Prinzip war die Ableitung jener negativen Resultate aus möglichst allgemeinen Postulaten, zu denen vielfältige experimentelle Versuche geführt hatten.

Im 18. Jahrhundert hatte man versucht, ein Perpetuum mobile zu bauen. Der Mißerfolg all dieser Versuche wurde in Form einer allgemeinen Regel formuliert. Es war dies eine jener Regeln, die im weiteren „Postulate der Unmöglichkeit" genannt wurden. Die Thermodynamik leitete dieses Postulat aus der allgemeinen Idee der Äquivalenz der verschiedenen Energiearten ab, und danach wurde das negative „Postulat der Unmöglichkeit" ein positives Gesetz, das nicht nur die quantitative Erhaltung, sondern auch die qualitative Umwandlung der Energie behauptete.

Einen analogen Weg durchlief die experimentell erwiesene Unmöglichkeit, eine auf den Äther bezogene Bewegung festzustellen. Die systematische Erklärung dieser Unmöglichkeit wurde durch Einstein in der Theorie erreicht, die jegliches Registrieren einer absoluten Bewegung auf Grund äußerst allgemein formulierter Ausgangsgesetze für die Bewegung ausschloß.

In seinem Brief an Maurice Solovine vom 24. April 1920 sagte Einstein: „Existierte ein körperlicher den ganzen Raum erfüllender, starrer Lichtäther, so könnten alle Bewegungen der körperlichen Objekte auf ihn bezogen werden, und man könnte in diesem physikalischen Sinne von ‚absoluter Bewegung' sprechen und auf diesem Begriff auch die Mechanik gründen. Nachdem aber die Bemühungen gescheitert waren, den durch den hypothetischen Lichtäther bevorzugten Bewegungszustand durch physikalische Versuche aufzufinden, lag es nahe, das Problem umzukehren. Das tat die Relativitätstheorie in systematischer Weise. Sie setzte voraus, daß es bevorzugte Bewegungszustände in der Natur nicht gebe und fragte nach den Folgerungen, welche aus dieser Voraussetzung bezüglich der Naturgesetze gezogen werden können. Die Methode der Relativitätstheorie ist derjenigen der Thermodynamik weitgehend analog; denn diese letztere Wissenschaft ist nichts weiter als die systematische Beantwortung der Frage: wie müssen die Naturgesetze beschaffen sein, damit es unmöglich sei, ein perpetuum mobile zu konstruieren?"[14]

3. *Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*

Die ersten Versuche, die die Nichtexistenz eines Ätherwindes bewiesen, waren fast 25 Jahre vor der Relativitätstheorie durchgeführt worden. Sie erregten nach vielfacher Wiederholung in dem Moment Aufmerksamkeit, als der absolute Raum im Bilde des ruhenden Äthers physikalische Konkretheit gewann und die Existenz dieses absoluten Raumes und der absoluten Bewegung Objekt experimenteller Prüfung werden konnte. 1881 führte Michelson so exakte Beobachtungen durch, daß sie erlaubten, auch Effekte zu entdecken, die von der zweiten Potenz des Verhältnisses „mechanische Geschwindigkeit des Systems zur Lichtgeschwindigkeit" abhängen.

[14] A. Einstein, Briefe an Maurice Solovine, Berlin 1960, S. 18.

Im Interferometer Michelsons wird ein Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Einer durchläuft einen definierten Weg hin und zurück parallel zur Erdbewegung, der andere, genausolange Weg steht senkrecht zum ersten. Die Bewegung des Lichtes in der Längsrichtung dauert etwas länger als die in der Querrichtung. Diese kleine Differenzgröße ist proportional zum Quadrat des Bruches Erdbewegung zu Lichtbewegung im Äther. Die Existenz einer solchen Differenz sollte der Versuch aufdecken, der 1887 durch Michelson und Morley durchgeführt und danach mehrfach mit steigender Vervollkommnung des Apparates wiederholt worden ist. Die Resultate aller Versuche waren jedoch negativ.

Daneben wurden auch andere Experimente angestellt, besonders mit elektrischen Kondensatoren und Leitern. Trouton und Noble hängten einen Plattenkondensator unter einem bestimmten Winkel zur Erdbewegung auf. Falls der Äther von der Erde nicht mitgeführt wird, muß die Bewegung des Kondensators Kräfte hervorrufen, welche die Kondensatorenebene parallel zur Bewegungsrichtung zu drehen trachten. Trouton und Noble prüften, ob die Drehung eines Leiters aus der Querstellung zur Erdbewegung in die Längsstellung solche Kräfte hervorrufe. Die Versuche zeigten, daß die Erdbewegung sich in den elektrodynamischen Erscheinungen *nicht* zeigt. Die Experimente, die das Fehlen eines Ätherwindes bewiesen, stellten für die Lehre vom ruhenden Äther ein experimentum crucis dar. Der ruhende Äther wurde verworfen. Aber die Hypothese der Mitführung des Äthers war ebenfalls nicht annehmbar.

Im Jahre 1851 hatte Fizeau untersucht, ob Körper den Äther bei ihrer Bewegung mitführen. Er sandte einen Lichtstrahl durch eine Röhre mit fließendem Wasser. Es zeigte sich, daß das Wasser den Äther nur zum Teil mitführte. Fizeaus Versuch, bei dem das Wasser das innere und die Röhre das äußere System darstellten, hatte gezeigt, daß man nicht von einer vollständigen Äthermitführung sprechen kann, daß die Körper bezüglich des Äthers ihren Standort ändern. Daraus ergibt sich eine zweite Hypothese. Nehmen wir an, der Äther werde durch materielle Körper *nicht* mitgeführt und unser System mit seiner Lichtquelle und den beiden Schirmen bewege sich in bezug auf den Äther. Dann wird für ein äußeres System die Lichtgeschwindigkeit konstant und unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und der Schirme sein. In dem sich bewegenden System erreicht das Licht den Vorderschirm später. Es muß ihn einholen, und gemäß dem Additionstheorem für Geschwindigkeiten ist die Lichtgeschwindigkeit im sich bewegenden System nicht gleichmäßig: in Richtung Vorderschirm wird sie 300000 km/s minus der Systemgeschwindigkeit sein, in umgekehrter Richtung hingegen 300000 km/s plus der Systemgeschwindigkeit.

Gleichgültig also, ob nun die Körper den Äther mitführen oder nicht, die Lichtgeschwindigkeit muß sich als unterschiedlich erweisen — im ersten Fall bezüglich des äußeren Systems, im zweiten Fall bezüglich des Systems, das sich zusammen mit der Lichtquelle bewegt. Die experimentelle Grundlage des speziellen Relativitätsprinzips ist die Tatsache, daß weder die eine noch die andere Annahme bestätigt wird. Das Licht breitet sich mit derselben Geschwindigkeit aus, sowohl

in bezug auf ein sich bewegendes Koordinatensystem wie auch in bezug auf ein äußeres, das sich relativ zum gegebenen System bewegt. So zwangen die sorgfältig aufgestellten und vielfach geprüften Experimente die Physiker, die Hypothese der Mitführung und dann auch die des ruhenden Äthers aufzugeben.

Historisch gesehen war der Versuch von Lorentz sehr wichtig, die Resultate von Michelson und anderen unter Beibehaltung des ruhenden Äthers und der unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeit in relativ zueinander bewegten Systemen zu erklären. In den neunziger Jahren hatte Lorentz eine Hypothese ausgearbeitet, die vorher bereits Fitzgerald in seinen Vorlesungen ausgesprochen hatte. Nach dieser Hypothese ist die Lichtgeschwindigkeit in zueinander bewegten Systemen unterschiedlich. Diesen Umstand könnte man mit Hilfe von optischen Beobachtungen feststellen, wenn die Zeiten für die Längs- und Querbewegung des Lichtes im Interferometer nicht infolge Verkürzung aller Längsmaßstäbe in Systemen, die sich relativ zum Äther bewegen, gleich werden würden. In Lorentz' Artikel über elektromagnetische Erscheinungen in einem mit beliebiger Unterlichtgeschwindigkeit bewegten System[15] ist eine höchst vollständige Formulierung dieser Kontraktionshypothese gegeben. Lorentz geht von den Grundgleichungen der Elektronentheorie aus und führt folgende Zusatzhypothese ein: Im Ruhezustand kann man Elektronen als Kugeln ansehen, bei Vorwärtsbewegung durch den Äther werden sie deformiert, ihre Abmessungen in Längsrichtung verkleinern sich. Dabei ist die Verkleinerung gleich dem Bruch Elektronengeschwindigkeit durch Lichtgeschwindigkeit. Mit anderen Worten: Die Elektronenkugeln verformen sich zu Ellipsoiden, deren kleine Achsen in der Richtung der Bewegung liegen. Weiter nimmt Lorentz an, daß sich die Kräfte zwischen ungeladenen Teilchen sowie zwischen ungeladenen Teilchen und Elektronen bei Bewegungen relativ zum Äther so verändern wie die elektrischen Kräfte. Infolgedessen erleiden alle Körper dieselben Deformationen wie die Elektronen.

Die Lorentzsche Transformationsformel für die Längsabmessungen zeigt, in welchem Maße sich diese Abmessungen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Körper im Äther verkürzen. Diese Formeln führen zu dem Schluß, daß die Verkürzung der Körpermaße die Veränderung der Lichtgeschwindigkeit kompensiert. Lorentz' Transformationsformeln für lineare Maßstäbe in Bewegungsrichtung und für Zeiten wurden durch Einstein und Poincaré präzisiert und legten den Grund zur Relativitätstheorie. Aber in Lorentz' Arbeit selbst war das Relativitätsprinzip, das der Idee des ruhenden Äthers widersprach, noch nicht ausgesprochen. Die Bewegung im ruhenden Äther bleibt, sie ruft bestimmte elektrodynamische Effekte hervor, doch äußert sie sich synchron mit einer Verkürzung der Maßstäbe und einer Veränderung der Lichtgeschwindigkeit, so daß sich diese Resultate der Bewegung im Äther gegenseitig aufheben.

[15] H. A. Lorentz, Proc. Acad. Amsterdam, vol. 6 (1904) p. 800.

Die Bewegung deformierter Körper bleibt absolute Bewegung, Bewegung im absoluten Raum, und zwar in jener elektrodynamischen Form, die Lorentz dem absoluten Raum zuschrieb. Lorentz bewies ferner, daß in bewegten Systemen die Zeit schneller fließt als in Systemen, die relativ zum Äther ruhen, die also die „wahre" Zeit enthalten.

Im Jahre 1912 betonte Lorentz in einer Anmerkung zu seinem Artikel aus dem Jahre 1904, daß das Verdienst Einsteins darin bestehe, als erster das Relativitätsprinzip in Form eines allgemeinen, streng und genau wirkenden Gesetzes ausgesprochen zu haben.[16]

Im Sommer 1905 schrieb Poincaré den Artikel „Über die Dynamik des Elektrons". Der Artikel beginnt mit der Feststellung: Optische und elektrodynamische Messungen vermögen eine Absolutbewegung von Systemen nicht zu entdecken. Poincaré zieht von da aus folgenden Schluß: „Diese Unmöglichkeit, mittels eines Versuches eine absolute Erdbewegung aufzuzeigen, scheint offenbar ein allgemeines Naturgesetz darzustellen; wir kommen ganz natürlich dazu, dieses Gesetz anzunehmen, welches wir Postulat der Relativität nennen werden, und wir nennen es ohne Vorbehalte so. Gleichgültig, ob später dieses Postulat, das bis jetzt mit der Erfahrung übereinstimmt, durch genauere Messungen bestätigt oder widerlegt wird, gegenwärtig ist es auf jeden Fall interessant zu sehen, welche Folgen aus ihm gezogen werden können."[17]

Der Artikel Poincarés erschien zu Beginn des Jahres 1906 in genannter italienischen Zeitschrift. Zur selben Zeit lag in der Septembernummer 1905 der „Annalen der Physik" bereits Einsteins Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" gedruckt vor.[18] In diesem Artikel resultiert die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen, zueinander bewegten Bezugssystemen aus allgemeinsten Postulaten für Raum und Zeit. In der Lorentzschen Theorie ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ein phänomenologisches Ergebnis der besprochenen beiden einander kompensierenden Effekte.

In der Theorie Einsteins hat die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit substantiellen Charakter, und die Relativität ist nicht charakteristisch für die Resultate des Experimentes, sondern für das von jeglichem Experiment unabhängige Wesen der Lichtgeschwindigkeit aus allgemeinen Vorstellungen über Raum und Zeit, nicht aus der Elektrodynamik.

Im Jahre 1955, kurz vor seinem Tode, schrieb Einstein an Seelig: „Wenn man auf die vergangene Entwicklung der Relativitätstheorie blickt, so wird kein Zweifel daran bestehen, daß sie 1905 reif geworden war, zu erscheinen. Lorentz wußte schon, daß den Maxwell'schen Gleichungen Transformationen entsprechen, die seitdem seinen Namen tragen, und Poincaré vertiefte diese Idee. Mir war die fundamentale Arbeit Lorentz', die 1895 erschienen war, bekannt, doch die spätere Arbeit und die mit ihr zusammenhängende Untersuchung Poincarés kannte ich nicht. In dieser Hinsicht war meine Arbeit selbständig. Das Neue an ihr bestand

[16] Zit. nach: Принцип относительности, Leningrad 1935, S. 23.
[17] H. Poincaré, Rendiconti del Circulo Matematico di Palermo, vol. XXI, 1906, p. 129.
[18] A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, in: Annalen der Physik, Bd. 17 (1905), S. 891–921.

im folgenden. Die Lorentztransformationen wurden hier nicht aus der Elektrodynamik erschlossen, sondern aus allgemeinen Vorstellungen."[19]

Die allgemeinen Vorstellungen nehmen die Resultate vorweg — nämlich die Unmöglichkeit, eine absolute Bewegung zu registrieren. In einem Brief an Solovine schrieb Einstein: „Charakteristisch für die Relativitätstheorie ist ferner ein mehr erkenntnistheoretischer Gesichtspunkt. Es gibt in der Physik keinen Begriff, dessen Verwendung a priori nötig und berechtigt wäre. Ein Begriff erhält seine Daseinsberechtigung nur durch seine klare und eindeutige Verknüpfung mit Erlebnissen bzw. mit physikalischen Erfahrungstatsachen. So werden in der Relativitätstheorie die Begriffe absolute Gleichzeitigkeit, absolute Geschwindigkeit, absolute Beschleunigung usw. verworfen, weil sich ihre eindeutige Verbindung mit der Erlebniswelt als unmöglich herausstellt ... Jedem physikalischen Begriff muß eine solche Definition gegeben werden, daß auf Grund dieser Definition das Zutreffen oder Nichtzutreffen desselben im konkreten Falle prinzipiell entschieden werden kann."[20]

Einsteins Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" beginnt mit der Konstatierung eines experimentell nachgewiesenen Faktums: In Systemen, die sich gegeneinander gleichförmig und geradlinig bewegen, erfolgen die elektromagnetischen Erscheinungen gleichartig, und dies bezieht sich nicht nur auf Größen erster Ordnung, sondern auch auf Größen zweiter Ordnung. Dieses experimentell erhaltene Relativitätsprinzip verbindet Einstein mit der These von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Diese These widerspricht der klassischen Regel für die Addition von Geschwindigkeiten. Verbindet man sie mit dem genannten Relativitätsprinzip, so kann man eine in sich widerspruchsfreie Elektrodynamik erhalten, aber der Begriff des Äthers wird dabei leer; da in der vorgeschlagenen Theorie der „absolut ruhende Raum" verschwindet, dessen physikalisches Äquivalent der Äther war. „Die Einführung eines ‚Lichtäthers' wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter ‚absolut ruhender Raum' eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektrodynamische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird."[21]

Hier ist die Rede von der physikalischen Inhaltslosigkeit der Geschwindigkeit eines Körpers gegenüber dem Äther. In der klassischen Physik besteht die Geschwindigkeit des Lichtes in bezug auf Körper aus zwei Komponenten: aus der Lichtgeschwindigkeit im Raum und aus der Geschwindigkeit des Körpers, bezogen auf diesen Raum. Nunmehr können wir die Lichtgeschwindigkeit nicht mehr in diese Komponenten aufteilen, die sich nach dem Additionstheorem der klassischen Mechanik zusammensetzen. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat immer ein und denselben Wert; wenn wir diese Geschwindigkeit, bezogen auf Körper messen, die sich gegeneinander gleichförmig und geradlinig bewegen, erhalten wir stets das gleiche Resultat.

[19] C. Seelig, Albert Einstein, Zürich 1960, S. 116.
[20] A. Einstein, Briefe an Maurice Solovine, a. a. O., S. 20.
[21] A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, a. a. O., S. 892.

Wenn der Raum aufhört, das Medium zu sein, dessen Punkte gegenüber einem Körper eine Geschwindigkeit besitzen, so verliert die alte Vorstellung von Gleichzeitigkeit ihren Sinn. Einstein kommt, ausgehend von der Unveränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit in zueinander bewegten Inertialsystemen, zur These, die Gleichzeitigkeit sei relativ. Ereignisse, die in einem Bezugssystem gleichzeitig sind, werden es in einem anderen nicht sein. Einstein formuliert die Relativität der Gleichzeitigkeit in Form der These, es sei unmöglich, Uhren, die in *einem* Bezugssystem ruhen, mit Uhren zu synchronisieren, die in einem *anderen* Bezugssystem ruhen, das sich gegenüber dem ersten bewegt. Synchroner Lauf von Uhren bedeutet nämlich, daß Ereignisse, denen gleiche Zeigerstellungen entsprechen, gleichzeitig sind. Doch was für den im ersten System ruhenden Beobachter gleichzeitig ist, ist nicht gleichzeitig für einen sich bewegenden Beobachter; die für den ruhenden Beobachter synchronen Uhren hören auf, synchron zu sein, wenn er sich gegenüber dem System bewegt, in dem die Uhren ruhen.

Analog dazu werden auch räumliche Größen gemessen. Einstein formuliert die Relativität der Maßstäbe in der folgenden These: Die Länge eines Stabes, gemessen in einem Bezugssystem, darinnen der Stab ruht, und die Länge desselben Stabes, gemessen in einem zum Stabe bewegten Bezugssystem, unterscheiden sich voneinander.

Der folgende Paragraph des Artikels von Einstein befaßt sich mit den Transformationen der räumlichen Koordinaten und der Zeit beim Übergang von einem ruhenden System zu einem System, das sich gegenüber dem ersteren in gleichförmiger geradliniger Bewegung befindet. Wir legen diesen Paragraphen mit ein wenig geänderter Buchstabenbezeichnung dar. Gegeben seien die beiden Systeme XYZ und $X'Y'Z'$. Die Achsen X und X' sollen zusammenfallen, Y und Y' sowie Z und Z' seien einander parallel. In jedem System werden die gleichen Uhren und Maßstäbe verwendet. Das System mit den gestrichenen Achsen bewege sich mit der Geschwindigkeit v längs der X-Achse, d. h., sein Koordinatenanfangspunkt bewege sich im nicht gestrichenen System in Richtung wachsender x. Die Zeit im ruhenden System wird mit t bezeichnet. Wir messen nun im ruhenden System mittels eines in ihm ruhenden Maßstabes die Koordinaten irgendeines Punktes und bezeichnen sie mit x, y, z. Im bewegten System erhalten wir mittels eines bewegten Maßstabes für denselben Punkt die Koordinaten x', y', z'. Dann fixieren wir mittels einer ruhenden Uhr den Zeitmoment t für den Punkt des ruhenden Systems XYZ, und mit einer anderen Uhr, die sich zusammen mit X', Y', Z' bewegt, also mit einer Uhr, die in diesem letzteren System ruht, bestimmen wir die Zeit t' in diesem System. Wenn im Punkt x, y, z zur Zeit t irgendein Ereignis stattfand, so wird dieses im bewegten System durch die Größen x', y', z' und t' bestimmt. Wie ist von den nichtgestrichenen Größen zu den gestrichenen überzugehen? Durch welche Gleichungen sind sie miteinander verbunden?

Aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und den Eigenschaften von Raum und Zeit beim Übergang von XYZ zu $X'Y'Z'$ werden die Lorentz-Transforma-

tionen abgeleitet:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Hinsichtlich dieser Transformationen sind Gleichzeitigkeit sowie räumliche und zeitliche Intervalle nicht invariant; sie ändern sich beim Übergang von einem Inertialsystem zum anderen. Aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich die Existenz einer anderen Invarianz. Als solche dient das Intervall der Eigenzeit. Es ist mit dem räumlichen und dem zeitlichen Intervall durch eine einfache Beziehung verbunden. In einem der Inertialsysteme messen wir den Abstand zwischen den Punkten A_1 und A_2, in denen zwei Ereignisse stattgefunden haben mögen. Die Koordinaten des ersten Punktes seien x_1, y_1, z_1, die Koordinaten des zweiten x_2, y_2, z_2. Der räumliche Abstand zwischen A_1 und A_2 werde r genannt. Sein Quadrat ist gleich der Summe der Quadrate der Koordinatendifferenzen beider Punkte:

$$r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2.$$

Die Zeit t, die zwischen den beiden Ereignissen in den Punkten A_1 und A_2 verflossen ist, ist nicht lorentzinvariant, ebenso nicht der Abstand zwischen diesen Punkten. Wir erheben t ins Quadrat und rechnen daraus das Quadrat der Zeit aus, die das Licht braucht, um die Distanz r von A_1 nach A_2 zu durchlaufen. Die Differenz

$$\tau^2 = t^2 - r^2/c^2$$

ist nun lorentzinvariant. Wenn zum Beispiel die Ereignisse in A_1 und A_2 der Abgang eines Lichtsignals in A_1 und seine Ankunft in A_2 sind, so fällt die Zeit t mit der Zeit r/c zusammen, und in diesem Falle ist $\tau^2 = 0$, in welchem System wir auch die Messung durchführen mögen. Im Falle anderer Ereignisse, die voneinander durch ein Zeitintervall getrennt sind, welches das Intervall übertrifft,

das das Licht braucht, um r zu durchlaufen, wird τ^2 größer als Null:

$$\tau^2 = t^2 - r^2/c^2 > 0,$$

weshalb τ eine reelle Größe ist. Wenn das Ereignis in A_2 stattfindet, ehe das Licht von A_1 nach A_2 gelangt ist, wenn also $t^2 < r^2/c^2$, dann ist

$$\tau^2 = t^2 - r^2/c^2 < 0,$$

und τ ist eine imaginäre Größe.

Natürlich ist auch die Differenz „Zeit zwischen den Ereignissen minus Zeit, die das Licht zum Durchlaufen benötigt", invariant, wenn man sie mit umgekehrten Vorzeichen wie τ^2 versieht, also

$$r^2/c^2 - t^2.$$

Diesen Ausdruck, multipliziert mit c^2, bezeichnen wir künftig mit s^2:

$$s^2 = r^2 - c^2t^2.$$

Wir vermerken, daß τ und s unterschiedliche Bedeutung haben: τ^2 ist das Quadrat der Zeit zwischen den Ereignissen minus dem Quadrat der Zeit, die das Licht zum Durchlaufen von r braucht. Hingegen ist s^2 das Quadrat des räumlichen Abstandes zwischen den Ereignissen minus dem Quadrat der Strecke, die das Licht in der zwischen den Ereignissen liegenden Zeit durchlaufen hat.

Einstein nannte τ das *Intervall der Eigenzeit.* Er ging dabei von folgenden Vorstellungen aus: Wir stellen uns ein Bezugssystem vor, das sich von A_1 nach A_2 mit einer solchen Geschwindigkeit bewegt, daß die Ereignisse in den Koordinaten dieses Systems in ein und demselben Raumpunkt stattfinden. Beispielsweise möge das erste Ereignis auf dem Bahnsteig der Stadt A_1 um Mitternacht und das zweite Ereignis auf dem Bahnsteig der Stadt A_2 am Mittag stattfinden. Für einen Zug, der aus A_1 in A_2 nach zwölf Stunden Fahrt angekommen ist, sind diese Ereignisse in ein und demselben Raumpunkt vonstatten gegangen; in einem Bezugssystem, darin der Zug ruht, fallen die Koordinaten der Punkte A_1 und A_2 zusammen. Dementsprechend ist in diesem System $r = 0$ und $r^2/c^2 = 0$. Darum ist gemäß der Gleichung $\tau^2 = t^2 - r^2/c^2$ in dem Zug als System die Zeit t, die zwischen den beiden Ereignissen vergangen ist, gleich τ. Mit anderen Worten: Die Uhr im Zug zeigt die Eigenzeit an.

Diese Intervalle werden offensichtlich imaginär, wenn die Geschwindigkeit des Zuges die des Lichtes übersteigt. In diesem Falle würde eine andere Invariante reell: $s^2 = r^2 - t^2c^2$.

Ereignisse, zwischen denen eine Zeit verfließt, die größer ist als die Zeit, welche das Licht braucht, um von A_1 nach A_2 zu gelangen, sind voneinander durch *zeitartige* Intervalle getrennt. In diesem Fall ist τ reell und s imaginär. Solche Ereignisse können zueinander in der Ursache-Wirkung-Beziehung stehen.

Ereignisse, von denen das zweite früher eintrat, als ein Lichtsignal von A_1 zu A_2 gelangen konnte, sind voneinander durch *raumartige* Intervalle getrennt. Diese Ereignisse können nicht in Form von Ursache und Wirkung miteinander verbunden sein. In ihrem Fall ist s eine reelle und τ eine imaginäre Größe.

Vermerkt sei, daß man im allgemeinen Fall ein unendlich kleines Zeitintervall dt und Rauminterval dr benutzen muß. Dann erhalten wir für das Intervall der Eigenzeit:

$$d\tau^2 = dt^2 - dr^2/c^2,$$

und für die zweite Form der Invarianten der Lorentz-Transformationen

$$ds^2 = dr^2 - c^2dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2.$$

Nun betrachten wir eine Schlußfolgerung Einsteins aus der Tatsache, daß sich Systeme nicht mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen können. Aus der Lorentz-Transformation leitete er als Additionstheorem für die Geschwindigkeiten v_1 und v_2

$$v = (v_1 + v_2)/(1 + v_1v_2/c^2)$$

ab. Diese Formel geht bei kleinen Geschwindigkeiten in das klassische Theorem $v = v_1 + v_2$ über. Offensichtlich kann die resultierende Geschwindigkeit entsprechend dem relativistischen Additionstheorem, wenn v_1 wie auch v_2 kleiner als c sind, nie größer oder auch nur gleich groß c werden. Die Geschwindigkeit c selbst ändert sich nicht, wenn man zu ihr eine neue Geschwindigkeit addiert. Sie ist die Grenzgeschwindigkeit.

In der Newtonschen Dynamik konnte die Geschwindigkeit unbegrenzt wachsen. Bei der Konstanz der Masse — und diese liegt Newtons Mechanik zugrunde — ruft jeder zusätzliche Impuls eine entsprechende Beschleunigung hervor. In Einsteins Dynamik ruft jede Übertragung einer Kraft auf einen sich bewegenden Körper zwar auch stets eine gewisse Beschleunigung hervor, doch die Geschwindigkeit kann hierbei eine bestimmte Grenze nicht überschreiten. Je höher die Geschwindigkeit ist, um so kleiner wird die Beschleunigung, die die gleiche Kraft hervorruft. In der Sprache der Mechanik ausgedrückt: Wenn sich die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Körpers der Lichtgeschwindigkeit nähert, strebt die Masse nach einem unendlich großen Wert, und folglich wird die Beschleunigung verschwindend klein. So verliert die Masse eines Körpers ihren Absolutwert; einen bestimmten Wert hat sie nur bezüglich eines gegebenen Koordinatensystems. Sie hängt von der Geschwindigkeit des Körpers, bezogen auf dieses System, ab.

So relativiert die Theorie Einsteins nicht nur die räumliche und zeitliche Ausdehnung, sondern auch die Masse. Wenn die Masse eines Körpers von der Bewegung des Systems abhängt, so muß man als Ausgangsbegriff die Masse m_0 eines Körpers betrachten, der im betreffenden System ruht, und dann übergehen zur Masse m desselben Körpers in dem System, auf das bezogen der Körper sich bewegt.

Die Größen von m_0 und m sind miteinander durch den Ausdruck

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

verbunden.

Im September 1905 schrieb Einstein einen kurzen Artikel, eine Ergänzung seiner ersten Arbeit über die spezielle Relativitätstheorie, in dem er auf zwei Seiten die berühmte relativistische Beziehung zwischen Masse und Energie $E = mc^2$ ableitete.[22] Für die Energie E eines Körpers, der sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, gilt:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Daraus folgt, daß bei $v = 0$ die Energie E_0 gleich m_0c^2 ist. Diese Beziehung zwischen Energie und Masse ist eine der wichtigsten Konsequenzen der Relativitätstheorie. Sie ist von der heutigen Kern- und Elementarteilchenphysik mit größter Exaktheit immer neu bestätigt worden.

4. Die vierdimensionale Welt

Nach den klassischen Arbeiten Einsteins waren für die weitere Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie die Arbeiten Hermann Minkowskis „Das Prinzip der Relativität“ (1907), „Die Grundgleichungen elektromagnetischer Erscheinungen in bewegten Körpern“ (1908) und „Raum und Zeit“ (1908) besonders bedeutsam.[23]

Diese Arbeiten erlaubten es, die Relativitätstheorie Einsteins in Form geometrischer Beziehungen darzulegen, analog den Beziehungen in der Geometrie Euklids. Doch im Unterschied zur gewöhnlichen dreidimensionalen euklidischen Geometrie handelt es sich dabei um eine vierdimensionale Geometrie.

Der Raum wird durch drei Koordinaten gemessen, die Zeit kann man als vierte Koordinate auffassen. So gesehen, ist die Vierdimensionalität der Welt eine alte Wahrheit, längst gewohnt geworden und eine Selbstverständlichkeit. Die analytische Geometrie gestattet, sich geometrische Objekte als numerische Größen vorzustellen, die in Gleichungen eingehen; sie ermöglicht aber ebenso, sich beliebige numerische Größen geometrisch vorzustellen. Eine solche Größe ist auch die Zeit. Trägt man auf eine Achse den durchlaufenen Weg und auf die andere die verstrichene Zeit auf, so erhält man eine graphische Darstellung der Bewegung in Form einer Kurve. Jeder Punkt derselben wird durch die Werte der Zeit und des zurückgelegten Weges charakterisiert. Bei Bewegung im dreidimensionalen

[22] A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, in: Annalen der Physik, Bd. 18 (1905), S. 639—641.

[23] „Raum und Zeit“ ist der Titel des Vortrags von H. Minkowski vor der 80. Naturforscherversammlung zu Köln. Vgl. Physikalische Zeitschrift Nr. 3, 10. Jahrgang, 1909, S. 104 — 111.

Raum ist die Zeitkoordinate rechnerisch die vierte Dimension, so daß die Mechanik als vierdimensionale Geometrie dargelegt werden kann. Die Behandlung der Zeit als vierte Koordinate wird dadurch gerechtfertigt, daß die realen Ereignisse eine vierte Dimension besitzen — die Dauer in der Zeit. Schon in der „Enzyklopädie" wird in dem von d'Alembert geschriebenen Artikel „Messung" gesagt: „Ich sagte weiter oben, daß es unmöglich ist, sich mehr als drei Dimensionen vorzustellen. Doch einer meiner Bekannten, ein äußerst scharfsinniger Mensch, meint, daß man die Dauer als vierte Dimension betrachten könne und daß die Multiplikation eines Volumens mit der Zeit ein Produkt ergäbe, das vier Dimensionen hat. Man kann diese Idee ablehnen, doch ich finde, daß sie trotz ihrer Neuartigkeit einen gewissen Wert hat."[24]

Solche Gedanken sind mehrfach geäußert worden. Doch Minkowski gab der Vorstellung von der Zeit als einer vierten Dimension einen tieferen Sinn. Er vergleicht zwei Methoden, Bewegung darzustellen. Wenn ein Punkt sich auf einer Geraden bewegt, kann man seine Bewegung als den Abschnitt darstellen, den er durchläuft, doch ergibt das noch kein komplettes Bild der Bewegung. Man muß auch die Geschwindigkeit und die Zeit vermerken, in welcher der Punkt jeden Punkt des genannten Abschnittes erreicht. Dies kann man erreichen, indem man auf jedem Punkt die Zeit seit dem Bewegungsbeginn als Parameter aufträgt. Aber man kann die Zeit auch durch Senkrechte in jedem Punkt des Abschnittes auftragen, wobei deren jeweilige Länge gleich der Zeit ist, die vom Bewegungsbeginn bis zum Erreichen des betreffenden Punktes verflossen ist. Wenn wir die Spitzen dieser Senkrechten miteinander verbinden, erhalten wir eine geometrische Darstellung des gesamten Bewegungsprozesses sowohl im Raum wie in der Zeit, also eine Raum-Zeit-Kurve, die die geradlinige Punktbewegung darstellt. Bewegt sich der Punkt auf einer Ebene, so liefert uns die erste Methode eine ebene Kurve mit auf ihr aufgetragenen Zeitparametern; die zweite Methode aber gibt uns eine dreidimensionale Kurve. Bewegt sich der Punkt im dreidimensionalen Raum, so kann man sich offensichtlich eine dreidimensionale Kurve mit Zeitparametern vorstellen, die in jedem ihrer Punkte angegeben sind, oder aber eine vierdimensionale Raumkurve, für welche es freilich kein anschauliches Modell gibt. Wenn wir die vierdimensionale Kurve auf den dreidimensionalen Raum projizieren, so hängen Aussehen der Projektion und Verteilung der Parameter auf ihr von der Auswahl des Bezugssystems im vierdimensionalen Raum ab. (Analoges gilt für alle Projektionen aus einem n-dimensionalen Raum auf einen $n - 1$-dimensionalen.) Wenn wir aber keine Projektionen benutzen, so hängt die Art der Kurve von keinerlei äußeren Oberflächen oder Linien ab. Die vierdimensionale Raum-Zeit-Kurve gibt so eine invariante, vom Bezugssystem unabhängige Vorstellung von der Bewegung, während ihre Projektion in den dreidimensionalen Raum vom räumlichen Bezugssystem abhängt.

Minkowskis Idee — der Übergang von der dreidimensionalen räumlichen Vorstellung mit einem die Zeit anzeigenden Parameter zur Vorstellung einer Be-

[24] Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des Sciences des arts et des métiers. Par société des gens de lettres. Mis en ordre et publié par m. Diderot et quant à la partie mathématique par m. D'Alembert, t. IV, Paris 1754, p. 1010.

wegung in einer vierdimensionalen Raum-Zeit — fällt mit Einsteins Vorstellung der Invarianz physikalischer Gesetzmäßigkeiten zusammen. Die Relativitätstheorie in der Form, die ihr Minkowski gegeben hat, läßt die Zeit ihren von der Raumvorstellung isolierten Charakter verlieren, der doch ein Grundprinzip der vorrelativistischen Physik war. Diese neue Vorstellung von der Beziehung zwischen Raum und Zeit erscheint Minkowski in der neuen Theorie so fundamental, daß ihm das Relativitätspostulat eine nicht genügend klare Benennung des neuen Ideenkomplexes zu sein scheint. „Indem der Sinn des Postulats wird, daß durch die Erscheinungen nur die in Raum und Zeit vierdimensionale Welt gegeben ist, aber die Projektion in Raum und Zeit noch mit einer gewissen Freiheit vorgenommen werden kann, möchte ich dieser Behauptung eher den Namen *Postulat der absoluten Welt* (oder kurz *Welt*postulat) geben."[25]

Den realen Ereignissen, die in Raum und Zeit stattfinden, entsprechen Punkte, charakterisiert durch die Werte der vier Koordinaten. Einen räumlichen Punkt in einem bestimmten Zeitmoment nennt Minkowski einen *Weltpunkt*, und die Gesamtheit aller denkbaren Weltpunkte, d. h. aller denkbaren Werte der vier Koordinaten, nennt er *die Welt*. Ereignisse werden durch Weltpunkte dargestellt, also durch Punkte eines vierdimensionalen Kontinuums. Dabei sieht Minkowski als Ereignis das Vorhandensein eines materiellen Punktes an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit. „Um nicht Materie oder Elektrizität zu sagen", schreibt Minkowski, „will ich für dieses Etwas das Wort Substanz brauchen."[26]

Nehmen wir nun an, ein substantieller Punkt befinde sich in irgendeinem Weltpunkt und wir könnten ihn zu jeder beliebigen Zeit wiedererkennen. Der Zeitwert soll einen bestimmten Zuwachs erhalten. Diesem wird eine Veränderung der Raumkoordinaten entsprechen. Dann erhalten wir eine Darstellung des Lebensweges dieses substantiellen Punktes, eine bestimmte Kurve in der Minkowskiwelt, eine sogenannte Weltlinie. „Die ganze Welt erscheint aufgelöst in solche Weltlinien, und ich möchte sogleich vorwegnehmen, daß meiner Meinung nach die physikalischen Gesetze ihren vollkommensten Ausdruck als Wechselbeziehungen unter diesen Weltlinien finden dürften."[27]

„Vollkommenster Ausdruck" der physikalischen Gesetze bedeutet im gegebenen Fall invarianter Ausdruck. Bei Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen ändert sich nicht die Lichtgeschwindigkeit, sondern der Zeitverlauf. Bei diesem Übergang erweist sich nicht die Zeit als invariant, sondern die Eigenzeit. Das heißt, daß die Transformationsformeln der klassischen Mechanik, die Galileitransformationen, ungenau sind, man sie also durch Formeln ersetzen muß, in denen die Zeit sich beim Übergang zu einem anderen Inertialsystem ähnlich wie der Raum ändert.

Von dieser Ähnlichkeit ging Minkowski aus und schuf mit rein mathematischen Hilfsmitteln jenen mächtigen Apparat für die physikalische Theorie, ohne welchen die spezielle Relativitätstheorie sich nicht so schnell zu einer allgemeineren Theorie hätte entwickeln können.

[25] H. Minkowski, Raum und Zeit, a. a. O., S. 107.
[26] Ebenda, S. 104.
[27] Ebenda.

Aus dem Gesagten wird deutlich, daß die Idee Minkowskis nicht mit der alten, der klassischen Physik durchaus nicht widersprechenden Vorstellung von der Zeit als einer vierten Koordinate identisch ist.

„Es ist ein verbreiteter Irrtum, daß die spezielle Relativitätstheorie gewissermaßen die Vierdimensionalität des physikalischen Kontinuums entdeckt bzw. neu eingeführt hätte. Dies ist natürlich nicht der Fall. Auch der klassischen Mechanik liegt das vierdimensionale Kontinuum von Raum und Zeit zugrunde. Nur haben im vierdimensionalen Kontinuum der klassischen Physik die ‚Schnitte' konstanten Zeitwertes eine absolute, das heißt von der Wahl des Bezugssystems unabhängige Realität. Das vierdimensionale Kontinuum zerfällt dadurch natürlich in ein dreidimensionales und ein eindimensionales (Zeit), so daß die vierdimensionale Betrachtungsweise sich nicht als *notwendig* aufdrängt. Die spezielle Relativitätstheorie dagegen schafft eine formale Abhängigkeit zwischen der Art und Weise, wie die räumlichen Koordinaten einerseits und die Zeitkoordinate andererseits in die Naturgesetze eingehen müssen."[28]

Die Relativitätstheorie handelt nicht davon, daß die Zeit als vierte Koordinate dargestellt werden kann, sondern davon, daß die drei Raumkoordinaten und die Zeit in bestimmter Weise voneinander abhängen und für sich gesondert genommen kein unmittelbares physikalisches Äquivalent finden.

„Der Umstand, daß es keine objektiv-sinnvolle Zerspaltung des vierdimensionalen Kontinuums in ein dreidimensional-räumliches und ein eindimensional-zeitliches Kontinuum gibt, bringt es mit sich, daß die Naturgesetze erst dann ihre logisch befriedigendste Form annehmen, wenn man sie als Gesetze des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums ausdrückt. Hierauf beruht der große methodische Fortschritt, den die Relativitätstheorie *Minkowski* verdankt."[29]

Minkowski und vor ihm Poincaré gingen aus von der metrischen Grundrelation der dreidimensionalen euklidischen Geometrie für das Abstandsquadrat zwischen zwei beliebig nahen Punkten

$$dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 .$$

Sie sahen die Ähnlichkeit zwischen dieser invarianten Form und der Invarianz der Lorentz-Transformationen:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 .$$

Wenn man mit $u = ict$ als vierter Dimension rechnet (wobei i die imaginäre Einheit ist), kann man ds den vierdimensionalen „Abstand" zwischen zwei Weltpunkten nennen. Man könnte dann die Minkowski-Welt eine vierdimensionale euklidische nennen, weil in ihr der Ausdruck für einen Abstand auch eine quadratische Form darstellt, wenn nicht die reale Koordinate t durch die imaginäre u substituiert wäre. Diesen Umstand berücksichtigend, nennt man die Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit eine *pseudoeuklidische* Mannigfaltigkeit.

[28] Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, a. a. O., S. 21/22.
[29] A. Einstein, Grundzüge der Relativitätstheorie, Braunschweig 1956, S. 20.

Die Lorentz-Transformationen haben die geometrische Form von Drehungen in der vierdimensionalen Raum-Zeit. Schon die klassische Physik kannte die Isotropie des dreidimensionalen Raumes, also das Fehlen ausgezeichneter Richtungen in ihm und die Invarianz der Abstände, bzw. allgemeiner: der räumlichen Strukturen gegenüber dreidimensionalen räumlichen Drehungen. Nun gewinnt die Isotropie einen weniger anschaulichen, dafür aber allgemeineren Charakter. Die vierdimensionale „Welt" erweist sich ebenfalls als isotrop. Die physikalischen Gesetze ändern sich nicht, die Gleichungen behalten ihre Form bei, das Raum-Zeit-Intervall bleibt invariant bei vierdimensionalen Drehungen. Diese enthalten räumliche Drehungen und Lorentz-Transformationen im engeren Sinn.

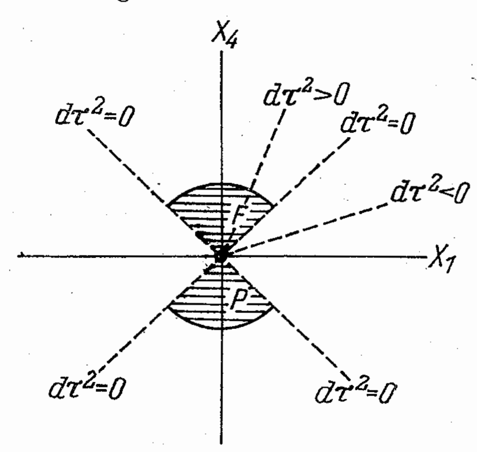


Abb. 1

Man kann die Unterteilung von $d\tau$ in ein raumartiges und ein zeitartiges Intervall geometrisch darstellen. Diese Unterteilung gewinnt eine besonders klare Form, wenn man sich auf eine Ebene X_1X_4 beschränkt, das heißt auf die durch die Koordinaten X_1 und X_4 aufgespannte Ebene.

Der Koordinatenursprung liegt im „hier" und „jetzt". Eine vertikale Gerade (parallel zur X_4-Achse) soll in dieser Zeichnung die Weltlinie eines unbewegten Punktes darstellen. Eine horizontale Gerade bedeutet die Weltlinie eines Punktes, der sich mit unendlicher Geschwindigkeit längs der Achse X_1 bewegt, oder die Projektion der Weltlinie eines Punktes, der sich mit unendlicher Geschwindigkeit in Richtung der Achse X_1 auf der Ebene X_4X_1 bewegt. Die Relativitätstheorie verneint die Möglichkeit einer solchen Geschwindigkeit. Grenzgeschwindigkeit ist für einen bewegten Punkt die Lichtgeschwindigkeit. Die Bewegung eines Lichtsignals stellt sich als die Gerade $d\tau^2 = 0$ dar. Dies ist die Weltlinie eines mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Punktes. *Der Winkel,* den die Gerade $d\tau^2 = 0$ mit X_4 bildet, entspricht der Lichtgeschwindigkeit. Er ist der größtmögliche Winkel für eine Gerade, welche die Bewegung eines in $x = 0$ zur Zeit $t = 0$ startenden materiellen Punktes oder die Ausbreitung der Wechselwirkung eines Punktes mit einem anderen verkörpert. Man kann auch von einer Geraden sprechen, die den kausalen Zusammenhang zwischen Ereignissen im vierdimensionalen Koordinatenursprung mit anderen Ereignissen darstellt. In dem X-

Sektor, der durch die Geraden $d\tau^2 = 0$ und die Achse X_1 begrenzt wird, befinden sich alle Geraden, für die $d\tau^2 > 0$ ist, das heißt alle Punkte der Fläche $X_1 X_4$, die mit dem Koordinatenursprung durch zeitartige Intervalle verbunden sind. Diesem unbegrenzten Sektor entspricht ein ebensolcher Sektor unterhalb der Achse X_1, weil die Weltlinien Ereignisse im Koordinatenursprung auch mit Ereignissen verbinden, die auf der Achse X_1 längs der anderen Seite vom „hier" in der Vergangenheit erfolgt sind, das heißt früher als „jetzt".

Ergänzt man das Schema durch die Achsen X_2 und X_3, d. h., berücksichtigt man alle Achsen der Raumzeit, dann schneidet die Gesamtheit aller Geraden, für die $d\tau^2 = 0$ gilt, aus der vierdimensionalen Welt einen anschaulich nicht vorstellbaren vierdimensionalen *Lichtkegel* aus, der durch eine gleichfalls nicht anschauliche dreidimensionale „Oberfläche" begrenzt wird.

Der Gedanke der Untrennbarkeit von Raum und Zeit liegt der ganzen relativistischen Mechanik und Elektrodynamik zugrunde. Die Mechanik der speziellen Relativitätstheorie vereinigt die drei Impulskomponenten und die der Energie zu einem vierdimensionalen Vektor. In der Elektrodynamik werden auf analoge Weise die Komponenten der Feldstärke des elektrischen und des magnetischen Feldes in einem Vektor vereinigt. Die Unterscheidung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern wird relativ: Die elektrische Ladung wird in dem einen System als in Ruhe und also als nur ein elektrisches Feld besitzend betrachtet, während sie sich in einem anderen System bewegt und daher auch ein magnetisches Feld bildet.

In der vierdimensionalen Betrachtungsweise ändert sich auch die Beziehung zwischen Impuls und Energie. Der Impuls ist ein Vektor mit drei Komponenten längs der drei Achsen des Raumes. Er charakterisiert das Verhalten eines Körpers in den einander folgenden Punkten seiner räumlichen Flugbahn. Erhaltung des Impulses bedeutet Homogenität des Raumes: In jedem neuen Punkt seines Weges verhält sich der Körper unverändert, vorausgesetzt, daß er keinen weiteren Stoß erhält. Die Energie charakterisiert einen Körper oder ein System von Körpern in den einander folgenden Zeitpunkten. Die Erhaltung der Energie bedeutet Unveränderlichkeit des Verhaltens der Körper in der Zeit bei Abwesenheit äußerer Kräfte. Mit anderen Worten: Dies bedeutet die Homogenität der Zeit, die Äquivalenz der einander folgenden Zeitpunkte. Von dieser vierdimensionalen Vorstellung aus kann man die Energie als vierte Komponente eines *einheitlichen vierdimensionalen Energie-Impuls-Vektors* ansehen.

Die beiden Erhaltungsgesetze verschmelzen zu einem Erhaltungsgesetz der vier Komponenten dieses Vektors. Entsprechend kann man von der *Homogenität der Raum-Zeit* sprechen: Kein Weltpunkt unterscheidet sich von einem anderen bezüglich des Verhaltens der Körper oder Körpersysteme, wenn auf sie keine äußeren Kräfte einwirken.

In Abhängigkeit von den äußeren Kräften verändert sich beim Übergang von einem Weltpunkt zu einem anderen der vierdimensionale Energie-Impuls-Vektor. Dabei verändern sich seine Komponenten unterschiedlich. Die Veränderung des Energie-Impuls-Vektors wird durch $4 \cdot 4 = 16$ Koeffizienten beschrieben, von denen 10 voneinander unabhängig sind. Sie bilden den Energie-Impuls-Tensor.

5. Das Äquivalenzprinzip

Eine wichtige Etappe auf dem Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie war das 1911 durch Einstein formulierte Äquivalenzprinzip. Gemäß diesem Prinzip kann man in unendlich kleinen Gebieten die Gravitation durch die Beschleunigung ersetzen. Damals wies Einstein auch auf die hieraus folgende Krümmung von Lichtstrahlen im Schwerefeld hin.

Schon lange vor der streng mathematischen Formulierung des Äquivalenzprinzips hatte Einstein das Bild eines sich bewegenden Fahrstuhls entworfen, in dem man die Wirkung von Beschleunigung und Gravitation nicht unterscheiden konnte.

Stellen wir uns einen Lift vor, der sich mit einer Beschleunigung aufwärts bewegt, die gleich der Beschleunigung durch das Schwerefeld ist, und daß letzteres zugleich verschwände. Was würde im Fahrstuhl geschehen?

Lassen wir irgendeinen Gegenstand los, so sehen wir ihn auf den Fußboden fallen. Alles geschieht so, als hinge der Lift an einem Seil in einem Schwerefeld. Wie könnte man beweisen, daß im gegebenen Fall nicht die Gravitation die Ursache der im Lift stattfindenden Geschehnisse ist, sondern dessen beschleunigte Bewegung? Im Falle der Schwerkraft wird das Verhalten der Gegenstände durch ihre schwere Masse bestimmt; im Falle der beschleunigten Bewegung spielt diese Rolle die träge Masse. Sind Beschleunigung und Schwere Äquivalente und rufen sie dieselben physikalischen Erscheinungen hervor, dann muß die träge Masse gleich der schweren Masse sein, und ein altes Rätsel der Newtonschen Mechanik erhält so seine Erklärung.

Nach Einstein wird die Erfahrungstatsache der gleichgroßen Beschleunigung aller fallenden Körper, die früher keinen Platz in den Grundlagen unseres physikalischen Weltbildes fand, vom Standpunkt des Äquivalenzprinzips evident.[30] Das Äquivalenzprinzip erlaubt in gewissem Grade (weiter unten wird gesagt werden, wie weit), die Bewegung eines Körpers im Schwerefeld eines ruhenden oder Inertialsystems und die keiner Gravitation unterworfene freie Bewegung eines Körpers in einem sich beschleunigt bewegenden System einander gleichzusetzen. In einem ruhenden Bezugssystem ist die freie Bewegung aller Körper gleichförmig und geradlinig. Das gilt auch für ein Inertialsystem. In einem sich beschleunigt bewegenden System bewegen sich alle frei beweglichen Körper mit der gleichen Beschleunigung. Ihre Geschwindigkeiten sind, wenn sie im Anfangsmoment gleich waren, auch weiterhin immer einander gleich. Bei gleichförmiger Beschleunigung des Bezugssystems zeigen alle in ihm befindlichen sich frei bewegenden Körper ihm gegenüber dieselbe Beschleunigung.

Die gleiche Beschleunigung gegenüber dem Inertialsystem haben auch Körper, die sich in einem homogenen und konstanten Schwerefeld befinden. Wir betrachten das Schwerefeld der Erde im Lift als Beispiel eines solchen homogenen und konstanten Feldes. Die Bewegung in einem System mit ungleichmäßiger

[30] A. Einstein, Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, in: Annalen der Physik, Bd. 35 (1911), S. 898–908.

Beschleunigung ist einer Bewegung in einem *veränderlichen* Gravitationsfeld äquivalent.

Einstein weist darauf hin, daß das Äquivalenzprinzip für mechanische Erscheinungen evident ist, sein tieferer Sinn jedoch in der Gleichwertigkeit von Schwere und Beschleunigung für *alle* physikalischen Erscheinungen besteht. Im wesentlichen hat schon Galilei die grundsätzlichen Beobachtungen gemacht, auf denen das Äquivalenzprinzip in der Mechanik beruht. Aus der gleichgroßen Fallgeschwindigkeit der Körper folgt die Gleichheit von schwerer und träger Masse und das sie erklärende Äquivalenzprinzip; doch reduziert sich die allgemeine Relativitätstheorie keineswegs auf dieses mechanische Prinzip. Hier ist dasselbe zu beobachten, was wir schon bei der speziellen Relativitätstheorie bemerkten, bei der die Verallgemeinerung des alten Relativitätsprinzips und seine Ausdehnung auf die elektrodynamischen Erscheinungen eine grundlegende Revision der Grundbegriffe der Physik und der Mechanik verlangten.

Stellen wir uns ein ruhendes System vor, in dem sich der Gravitation unterworfene Körper befinden, und ein anderes System, das sich beschleunigt bewegt, aber gravitationsfrei ist. Die Beschreibungen der Erscheinungen werden in beiden Systemen äquivalent sein, weil die physikalischen Auswirkungen von Beschleunigung und Schwere dieselben sind. Stellen wir uns nun vor, daß ein Lichtstrahl senkrecht zur Bewegungsrichtung und Gravitation eindringt. Zuerst mag man denken, das Licht werde sich in den beiden Situationen, die uns äquivalent erscheinen, unterschiedlich verhalten. Wenn das System sich bewegt, so verläßt das Licht dasselbe in einem Punkt, der gegenüber dem Eintrittspunkt ein wenig verschoben ist. Wenn hingegen das System statt einer Beschleunigung einer Gravitation unterworfen ist, dann verläßt der Lichtstrahl offensichtlich das System in einem Punkt, der demjenigen genau gegenüberliegt, durch den es eingetreten ist. Letzteres trifft aber nur dann zu, wenn das Licht im Gravitationsfeld nicht abgelenkt wird. Nun besitzt aber Licht träge Masse, und diese ist schwerer Masse äquivalent. Darum verschiebt sich ein Lichtstrahl unter Schwereeinfluß genauso, wie er es infolge Beschleunigung tun würde. Diese Schlußfolgerung rief eine lebhafte Diskussion hervor. Abraham veröffentlichte 1912 einen Artikel, in dem er es als eine Absage an die Relativitätstheorie ansah, das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit einzuschränken.[31] Als Antwort an Abraham gab Einstein eine klar umrissene Darlegung der Grenzen des speziellen Relativitätsprinzips.[32]

Vor allem verwies er darauf, daß das Relativitätsprinzip an sich für eine Theorie der Transformation von Raum und Zeit noch unzureichend ist. Die spezielle Relativitätstheorie beruht sowohl auf dem Relativitätsprinzip wie auch auf dem Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Gültig ist sie nur dort, wo *beide* Prinzipien ihre Berechtigung haben. Das erste von diesen hat nach Einsteins Meinung universalen Charakter. Hingegen beschränkt sich die Konstanz

[31] Vgl. M. Abraham, Die Erhaltung der Energie und der Materie im Schwerkraftfelde, in: Physikalische Zeitschrift, Nr. 8, 13. Jahrg., 1912, S. 311—314.

[32] A. Einstein, Relativität und Gravitation. Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham, in: Annalen der Physik, Bd. 38 (1912), S. 1059—1064.

der Lichtgeschwindigkeit auf Gebiete mit konstantem Gravitationspotential. Daher bedeutet die Einschränkung der speziellen Relativitätstheorie auf Gebiete mit einem derartigen konstanten Gravitationspotential *keine* Einschränkung des Relativitätsprinzips.

„Hier liegt nach meiner Meinung die Grenze der Gültigkeit zwar nicht des Relativitätsprinzips, wohl aber des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und damit unserer heutigen Relativitätstheorie.“[33] Nach einem Hinweis darauf, daß die Gravitation sich in das Schema der Relativitätstheorie nicht einfügt, fährt Einstein fort: „Diese Sachlage bedeutet nach meiner Ansicht aber keineswegs das Scheitern der auf das Relativitätsprinzip gegründeten Methode, ebensowenig als die Entdeckung und richtige Deutung der *Brown*schen Bewegung dazu führt, die Thermodynamik und Hydromechanik als Irrlehren anzusehen. Die heutige Relativitätstheorie wird nach meiner Ansicht stets ihre Bedeutung behalten als einfachste Theorie für den wichtigen Grenzfall des zeiträumlichen Geschehens bei konstantem Gravitationspotential. Aufgabe der nächsten Zukunft muß es sein, ein relativitätstheoretisches Schema zu schaffen, in welchem die Äquivalenz zwischen träger und schwerer Masse ihren Ausdruck findet. Einen ersten, recht bescheidenen Beitrag zur Erreichung dieses Zieles habe ich in meinen Arbeiten über das statische Gravitationsfeld zu geben gesucht. Dabei ging ich von der nächstliegenden Auffassung aus, daß die Äquivalenz von träger und schwerer Masse dadurch auf eine Wesensgleichheit dieser beiden elementaren Qualitäten der Materie bzw. der Energie zurückzuführen sei, daß das statische Gravitationsfeld als physikalisch wesensgleich mit einer Beschleunigung des Bezugssystems aufgefaßt wird. Es ist zuzugestehen, daß ich diese Auffassung nur für unendlich kleine Räume widerspruchsfrei durchführen konnte, und daß ich hierfür keinen befriedigenden Grund anzugeben weiß. Aber ich sehe hierin keinen Grund, jenes Äquivalenzprinzip auch für das unendlich Kleine abzuweisen; niemand wird leugnen können, daß dies Prinzip eine natürliche Extrapolation einer der allgemeinsten Erfahrungssätze der Physik ist. Andererseits eröffnet uns dies Äquivalenzprinzip die interessante Perspektive, daß die Gleichungen einer auch die Gravitation umfassenden Relativitätstheorie auch bezüglich Beschleunigungs- (und Drehungs-)Transformation invariant sein dürften. Allerdings scheint der Weg zu diesem Ziele ein recht schwieriger zu sein.“[34]

In den Jahren 1913 und 1914 erwirbt sich Einstein das für die Schaffung der allgemeinen Relativitätstheorie nötige mathematische Rüstzeug, die Tensoranalysis, und publiziert zusammen mit Marcel Grossmann zwei Artikel.

In diesen Arbeiten beginnt die allgemeine Relativitätstheorie bereits ihr gegenwärtiges Aussehen anzunehmen. Der erfolgreich gewählte mathematische Apparat erlaubt, die Idee der Kovarianz physikalischer Gleichungen in bezug auf immer allgemeinere Transformationen konkreter und tiefer durchzuführen.

In den Jahren 1915 und 1916 publiziert Einstein eine Reihe wichtiger Arbeiten, die Einzelprobleme und die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie

[33] Ebenda, S. 1062.
[34] Ebenda, S. 1063.

klären. Schließlich erscheint im Jahre 1916 der Artikel „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie".[35]

Im Jahre 1911 hatte Einstein betont, das Äquivalenzprinzip wäre nur für ein homogenes Gravitationsfeld gültig. „Natürlich kann man ein *beliebiges* Schwerefeld nicht durch einen Bewegungszustand des Systems ohne Gravitationsfeld ersetzen, ebensowenig, als man durch eine Relativitätstransformation alle Punkte eines beliebig bewegten Mediums auf Ruhe transformieren kann."[36]

Als Erwiderung auf einen kritischen Artikel Kottlers schreibt Einstein im Jahre 1916: „Sei das mit dem oben betrachteten Schwerefeld ausgestaltete System K' das ursprüngliche. Dann kann man ein neues, gegen K' beschleunigtes Bezugssystem einführen, mit Bezug auf welches sich (isolierte) Massen (in dem betrachteten Gebiete) geradlinig gleichförmig bewegen. Aber man darf nun *nicht* weitergehen und sagen: Ist K' ein mit einem *beliebigen* Gravitationsfeld versehenes Bezugssystem, so ist stets ein Bezugssystem K auffindbar in bezug auf welches sich isolierte Massen geradlinig gleichförmig bewegen, d. h. in bezug auf welches kein Gravitationsfeld existiert. Die Absurdität einer solchen Voraussetzung liegt auf der Hand. Ist das Gravitationsfeld in bezug auf K' zum Beispiel das eines ruhenden Massenpunktes, so läßt sich dieses Feld für die ganze Umgebung des Massenpunktes gewiß durch kein noch so feines Transformationskunststück hinwegtransformieren."[37]

Somit darf man in großen Gebieten mit inhomogenen Gravitationsfeldern letztere nicht auf Beschleunigungen von Bezugssystemen reduzieren. Betrachten wir nun das Prinzip der Äquivalenz von einer anderen Seite. Nehmen wir das klassische Beispiel — den rotierenden Eimer, der in Newtons „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie" angeführt wird. Newton hielt die Fliehkraft, die den Wasserspiegel an den Wänden des rotierenden Eimers ansteigen läßt, für einen Beweis seiner absoluten Rotation. Das Äquivalenzprinzip gestattet, den rotierenden Eimer als ein System zu betrachten, das *nicht* rotiert. Die Fliehkraft wird dabei durch eine Gravitation erklärt, die in diesem Inertialsystem wirkt und das Wasser im Eimer nach dessen Rand hin anhebt. Diese Schwerkraft ist einem rotierenden Nicht-Inertialsystem äquivalent. Doch Gravitationsfelder, die letztgenanntem System äquivalent sind, unterscheiden sich von „echten" Gravitationsfeldern in Inertialsystemen in folgender höchst wesentlicher Hinsicht.

Stellen wir uns ein „echtes" Gravitationsfeld vor, das durch materielle Körper erzeugt wird und sich unbegrenzt in alle Richtungen des Raumes erstreckt. Mit wachsendem Abstand vom Zentrum verringert es sich und strebt für unendliche Entfernung gegen Null.

Nun stellen wir uns den Newtonschen rotierenden Eimer vor. Die Fliehkraft, die das Wasser an den Rändern ansteigen läßt, *wächst* mit der Entfernung vom Zentrum. Für unendliche Entfernung nimmt sie den Wert Unendlich an. Einen

[35] A. Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, in: Annalen der Physik, Bd. 49 (1916), S. 769—822.

[36] A. Einstein, Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, a. a. O., S. 899.

[37] A. Einstein, Über Friedrich Kottlers Abhandlung „Über Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation", in: Annalen der Physik, Bd. 51 (1916), S. 640.

ähnlichen Unterschied zwischen „echten“ Gravitationsfeldern und Gravitationsfeldern, die einem Nicht-Inertialsystem äquivalent sind, findet man auch für ein geradliniges gleichförmig beschleunigtes System. Das dieser Beschleunigung äquivalente Gravitationsfeld wächst nicht, es bleibt auch in unendlicher Entfernung gleich stark.

Die Unmöglichkeit, das Äquivalenzprinzip auf Gebiete mit inhomogenen Schwerefeldern auszudehnen, war eine der grundlegenden Prämissen Einsteins.

Einstein hat im Verlauf mehrerer Jahre eine Theorie des homogenen Gravitationsfeldes ausgearbeitet, in welcher das Äquivalenzprinzip vollständig verwirklicht ist, in der also die Schwere vollständig durch Beschleunigung ersetzt werden kann. Aber der Übergang zur allgemeinen Relativitätstheorie als einer Theorie beliebiger Gravitationsfelder basierte auf einer Beschränkung des Äquivalenzprinzips auf unendlich kleine Gebiete. Aus dieser Einschränkung ergab sich eine weitere Idee Einsteins, die zur Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips führte, das heißt zur Aufstellung einer Theorie invarianter Transformationsgruppen, die allgemeiner als die Lorentz-Gruppe sind.

Um diese Gedanken darlegen zu können, muß man zunächst bei einigen geometrischen Begriffen verweilen, die schon bei der Besprechung der speziellen Relativitätstheorie genannt wurden. Es geht um eine allgemeine Darstellung der Transformation von Koordinaten und ihrer Invarianten.

6. *Transformationen und Invarianten*

Die Form, in der die spezielle Relativitätstheorie 1905 in Einsteins erstem Artikel dargelegt worden war, und noch mehr die Form, die Minkowski ihr gegeben hatte, erlaubten, den Zusammenhang zwischen Relativität und Invarianz einer Transformation klar zu erkennen. Den Unterschied zwischen dem klassischen Relativitätsprinzip von Galilei und Newton, dem speziellen Relativitätsprinzip Einsteins und dem allgemeinen Relativitätsprinzip kann man sich als Unterschied in den Transformationen vorstellen, die bestimmte physikalische Größen und Beziehungen invariant lassen.

In der klassischen Physik hielt man die räumlichen und zeitlichen Intervalle für invariant. Beim Studium der Bewegungen starrer Körper und Systeme kam man zu der Überzeugung, daß der Abstand zwischen zwei Punkten, etwa den Enden eines starren Körpers, sich bei seiner Bewegung nicht ändert, daß er nicht von der Lage des Stabes, nicht von der Wahl des Koordinatensystems abhängt. Die Lage jedes Punktes ist relativ (je nach der Wahl des Koordinatenursprungs), der Abstand zwischen den zum System gehörenden Punkten ist dagegen eine innere Systemeigenschaft, die nicht von der Lage der Punkte gegenüber dem Koordinatenursprung abhängt. Die Bewegungen eines Systems ändern nicht die Abstände zwischen seinen Punkten; das System bleibt starr. Deshalb kann man die Bewegung des Systems mittels seines Abstandes zu einem Bezugskörper bestimmen. Diese Eigenschaften materieller Körper spiegeln sich in den geometrischen Gesetzen wider. Natürlich beschreibt nicht jede beliebige Geometrie die Eigen-

schaften starrer Körper und Systeme. Die angewandte Geometrie kann man durch ihre Invarianten charakterisieren. In der euklidischen Geometrie der Ebene ist bei Koordinatentransformationen das Quadrat des Abstandes r zwischen zwei Punkten invariant. Dies ist gleich der Summe der Quadrate der Koordinatendifferenzen der beiden Punkte. Sind die Abschnitte auf der Ebene gekrümmt, muß man statt r dr wählen. So kommt man zur differentiellen quadratischen Form $dr^2 = dx^2 + dy^2$. In der euklidischen Geometrie des Raumes ist das Quadrat des beliebig kleinen Abstandes zwischen zwei Punkten des dreidimensionalen Raumes invariant:

$$dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Die Gesamtheit aller Invarianten der Abstände zwischen den materiellen Punkten eines Systems bildet seine räumliche Struktur.[38]

Diese Formeln für dr^2 bezeichnen den Übergang von Größen, die sich bei Wechsel des Bezugssystems ändern, zu einer Größe, die gegen Wechsel des Bezugssystems invariant ist und dessen Struktur widerspiegelt. Das eben Ausgeführte gilt nicht nur für den dreidimensionalen Raum, sondern allgemein.

Betrachten wir eine eindeutige Zuordnung zwischen einer physikalischen Mannigfaltigkeit F und der Menge der Zahlen M. Stellen wir uns eine Menge physikalischer Objekte oder Zustände eines Objektes vor und vergleichen wir die Eigenschaften dieser Objekte, die alle ein und derselben Klasse angehören — Dichte, Temperatur, Farbe, Lage im Raum usw. Die Eigenschaften, die sich auf ein und dieselbe Klasse beziehen, bilden eine physikalische Mannigfaltigkeit. Entsprechend dem Charakter der physikalischen Mannigfaltigkeit ordnen wir ihr die Menge der ganzen, der algebraischen oder die aller Zahlen zu. Diese Zuordnung einer Zahlenmenge zu einer physikalischen Mannigfaltigkeit nennt man *Parametrisierung* der Mannigfaltigkeit. Manchmal können die Mannigfaltigkeiten nicht durch die Zahlen dargestellt werden, sondern nur durch eine Menge von Systemen, deren jedes aus n Zahlen besteht. Dann spricht man von einer n-dimensionalen Mannigfaltigkeit. Mannigfaltigkeiten wie die Anzahl der Moleküle eines Gases in einem bestimmten Volumen parametrisiert man durch die Menge der ganzen Zahlen. Mannigfaltigkeiten wie Volumen, Gewicht, Temperatur werden durch Mengen größerer Mächtigkeit dargestellt, bis hin zur Menge aller Zahlen. Ereignisse sind durch Zahlenquadrupel zu parametrisieren: drei Zahlen für die Festlegung im Raum nach Länge, Breite und Höhe und eine Zahl zur Zeitpunktangabe.

Manchmal erlaubt die Zuordnung einer physikalischen Mannigfaltigkeit zu einer Zahlenmenge, nur in der Mannigfaltigkeit ein Element von anderen zu unterscheiden. Liegen Eigenschaften vor, die sich in einer Rangfolge ordnen lassen, auf die die Begriffe „mehr“ und „weniger“ anwendbar sind, so können wir eine vergleichende Intensitätswertung durchführen. Bei ihr entspricht der größeren Intensität auch eine größere Zahl. Hier haben wir es mit relativen Begriffen zu tun. „Größer“ und „kleiner“ haben nur Sinn im Hinblick auf eine gegebene Intensität. Gleiches gilt für Bewertungen wie „rechts — links“, „oben —

[38] А. А. Фридман, Мир как пространство и время, Москва 1965, S. 11—32.

unten“, „vorn — hinten“, „früher — später“. Jede dieser Angaben charakterisiert Ort- oder Zeitlage eines Ereignisses bezüglich eines anderen.

Einen Schritt weiter geht die Parametrisierung einer physikalischen Mannigfaltigkeit mit Hilfe einer Menge äquidistanter Zahlen. Wenn es sich um die drei Intensitäten f_1, f_2 und f_3 handelt, für die gilt, daß f_3 um genau so viel f_2 übertrifft, wie f_2 größer ist als f_1, können wir f_1, f_2, f_3 eine Zahlenreihe m_1, m_2, m_3 zuordnen, in der die Differenz zweier aufeinanderfolgender Zahlen stets konstant ist, wo also gilt: $m_n - m_{n-1} = \text{const.}$ für alle n.

Natürlich kann man die Eigenschaft „räumliche Lage eines Körpers“ nicht durch die Ausdrücke „größer“ oder „kleiner“ messen oder bewerten, wenn man diese Eigenschaften nicht in drei meßbare Intensitäten aufspalten kann. Jeder materielle Punkt hat eine räumliche Lage, die durch drei Größen bestimmt ist, und die Mannigfaltigkeit der räumlichen Lage wird durch eine Menge von Zahlentripeln parametrisiert. Ganz allgemein kann jedem Element einer physikalischen Mannigfaltigkeit bei der Parametrisierung ein Zahlen-n-Tupel zugeordnet werden, wobei n eine ganze Zahl ist.

Die Parametrisierung erlaubt, auch solche Begriffe quantitativ auszudrücken, die keinen Bezugskörper erfordern, die sich auf zwei oder mehr materielle Punkte beziehen und die Struktur einer solchen Mannigfaltigkeit ausdrücken. Eine Struktur kann man sich als eine Reihe meßbarer Intensitäten vorstellen, etwa die Eigenschaften geometrischer Figuren. Nach der Parametrisierung liegen sie als Zahlen vor. Beispielsweise sind räumliche Abschnitte (ein Abstand von 10 cm) und zeitliche Intervalle (ein Zeitraum von 10 Jahren) sowie Volumina und Flächen meßbare Intensitäten, die keines Hinweises auf festgesetzte Bezugskörper bedürfen. Die Parametrisierung dieser Eigenschaften kann mathematische Größen ergeben, die nicht von der Parametrisierung der Lagen abhängen. Allerdings ist auch hier ein Hinweis auf die Größe des Maßstabes nötig, doch werden wir diesen Umstand fortan nicht berücksichtigen.

Nun benötigen wir noch einen weiteren Begriff, den der *Transformation*. Unter einer Transformation verstehen wir den Übergang von der Parametrisierung $F \to M$ zur Parametrisierung $F \to M'$. Zuerst bringen wir einige Beispiele für Transformationen, dann werden wir Begriffe besprechen, die es gestatten, die zahllose Menge verschiedener Transformationen zu klassifizieren. Wir stellen uns die Parametrisierungen der gemessenen physikalischen Mannigfaltigkeiten $F \to M$ und $F \to M'$ vor. F wird durch die Wahl der Parametrisierung nicht verändert. Jedem Element f von F ist deshalb genau ein m bzw. m' (Element der Menge M bzw. M') zugeordnet. Folglich ist auch die Zuordnung der Elemente von M zu denen von M' eindeutig. Man sagt dazu: m' ist eine Funktion von m. Wenn wir beim Übergang von m zu m' nur den Anfangswert der zu messenden Intensität und den Maßstab ändern, können wir m' als Linearfunktion von m ausdrücken:

$$m' = f(m) = h + a \cdot m .$$

Dabei hängt die Konstante h von der Wahl des neuen Anfangswertes ab, a aber von der Wahl des Maßstabes. Wenn sich der Anfangswert bei der Transformation nicht ändert, wird h Null; wenn der Maßstab der alte bleibt, so wird a Eins.

Jetzt stellen wir uns vor, daß wir sämtliche geometrischen Eigenschaften physikalischer Körper parametrisieren, also die räumliche Lage ihrer Punkte, deren gegenseitige Abstände, die Winkel, Oberflächen, Volumen usw. Die räumliche Lage jedes Punktes ist bekanntlich durch ein Zahlentripel gegeben, die Werte der x-, y- und z-Koordinaten. Bei Koordinatentransformationen werden die neuen Koordinaten durch die alten Gleichungen ausgedrückt, deren Art vom Charakter der Transformationen abhängt. Nehmen wir, weil dies besonders einfach ist, cartesische Koordinaten. Wenn man statt der ursprünglichen Achsen andere aufeinander senkrecht stehende Achsen wählt, so gehen x_1, x_2, x_3 in x_1', x_2', x_3' über. Solche Transformationen nennt man orthogonale Transformationen. Hierbei bewegen sich die Körper, ohne die inneren Eigenschaften zu verändern. Es treten keine Deformationen auf. Orthogonale Transformationen beinhalten nicht nur Verschiebungen, sondern auch Spiegelungen, das heißt Umkehrungen einer Achsenrichtung. Diese Transformation erfolgt bei Übergang von einem Gegenstand zu seinem Spiegelbild.

Die Transformationen, die auf eine Drehung orthogonaler Koordinaten hinauslaufen, bilden eine Transformations*gruppe*. Eine Menge von Transformationen bildet dann eine Gruppe, wenn zwei nacheinander ausgeführte Transformationen eine Transformation derselben Klasse ergeben und wenn es zu jeder Transformation eine solche inverse Transformation derselben Klasse gibt, daß die Transformation und die inverse Transformation, nacheinander ausgeführt, die identische Transformation ergeben, das heißt die Parametrisierung nicht verändern. Die identische Transformation gehört ebenfalls der betreffenden Gruppe an. Transformationen, die in einer Drehung des Raumes und der in ihm befindlichen Körper um einen Punkt bestehen oder im Übergang zu einem neuen Koordinatensystem, dessen Achsen gegenüber den Achsen des alten gedreht sind, bilden die Gruppe der Drehungen.

Es gibt ferner Transformationen, die man sich physikalisch als Translation eines Körpers an einen anderen Ort ohne Auftreten von Drehungen vorzustellen hat, dessen Punkte bei der Verschiebung also parallele Wege durchlaufen. Diese Gruppe heißt *Gruppe der parallelen Translationen*. Dabei werden zu den Koordinatenwerten gewisse konstante Werte addiert.

Die beiden letztgenannten Gruppen bilden zusammen die *Gruppe der linearen orthogonalen Transformationen*. Bei ihnen bewegt sich eine geometrische Figur als starres Ganzes. Ein Beispiel dafür wäre die Verschiebung eines Blattes mit aufgezeichneter geometrischer Figur auf einem ebenen Tisch. Diese Transformationen kann man in die Gruppe der Bewegung ohne Deformationen einordnen. Bewegung ohne Deformation beschränkt sich auf Drehungen und Verschiebungen. Allgemeiner ist die *affine Gruppe*, bei der eine geometrische Figur nicht nur gedreht und verschoben werden kann, sondern auch gestaucht, so daß etwa aus dem Kreis eine Ellipse wird. Die allgemeine affine Gruppe fordert nicht mehr, daß rechtwinklige Koordinaten wieder in rechtwinklige Koordinaten überzugehen haben, was bei der orthogonalen affinen Gruppe der Fall ist. Wir haben es hier vielmehr mit schiefwinkligen Koordinaten zu tun. Die orthogonale affine Gruppe ist in der allgemeinen affinen Gruppe enthalten. Den allgemeinsten Charakter weist die *Gruppe der topologischen Transformationen* auf. Bei ihnen werden geometrische

Figuren beliebig auseinandergezogen, gestaucht, deformiert, jedoch treten keine Zerreißungen auf, so daß sich die Transformationen auf die Forderung nach Erhaltung der Stetigkeit beschränken.

Bei der Charakterisierung der Gruppen sind wir unmerklich von den Angaben, was sich ändert, zu Angaben, was erhalten bleibt, übergegangen. Einige räumliche Eigenschaften physikalischer Objekte sind unabhängig von der Parametrisierung; sie bleiben bei Übergang zu einer anderen Parametrisierung erhalten. Man nennt sie *eigene* Eigenschaften. Eigenschaften, die von der Parametrisierung abhängen, nennt man *nichteigene* Eigenschaften.

Der Übergang von nichteigenen zu eigenen Eigenschaften, der Übergang von den Koordinaten zu den Invarianten ist eine der wichtigsten Merkmale der Relativitätstheorie. Der Sinn des Wortes „Relativität" besteht, angewandt auf die Bewegung, in der Notwendigkeit eines Bezugskörpers für die Registrierung und Messung der Bewegung, im Fehlen innerer Veränderungen in sich bewegenden Körpern, in der Unveränderlichkeit der eigenen Eigenschaften dieses Körpers, in der Invarianz der diese Eigenschaften beschreibenden Größen. Das klassische Relativitätsprinzip basierte auf der Invarianz der Beschleunigung beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen. Grundlage der klassischen Mechanik ist die Invarianz des räumlichen Abstandes zwischen den Punkten und den Zeitintervallen beim Übergang von einem System zu einem anderen ohne Deformation, das heißt bei orthogonalen Transformationen in den Grenzen dieser Gruppe der Bewegungen. Fundament der speziellen Relativitätstheorie ist die Invarianz des vierdimensionalen Intervalls, das durch den Ausdruck

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

beschrieben wird, bezogen auf die Lorentz-Transformationen.

Lorentz-Transformationen charakterisieren den Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen. Nun betrachten wir, wie eine Invariante einer allgemeinen Transformation beschaffen sein muß, das heißt eines Überganges zu einem Bezugssystem, das sich beschleunigt bewegt. Wir gehen von der uns schon bekannten quadratischen Form

$$dr^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

aus. Sie bestimmt in der euklidischen Geometrie den Abstand zweier Punkte. Kennen wir die Koordinatendifferenzen, so können wir den Abstand zwischen den Punkten bestimmen. Mit anderen Worten: Uns ist die Funktion bekannt, die Abstand und Koordinaten miteinander verknüpft, dadurch ist die Metrik des Raumes bestimmt. Man kann einen allgemeinen Ausdruck für die Abstandsfunktion in den verschiedensten Räumen mit unterschiedlichen Metriken wie folgt einführen:

Im allgemeinen Fall enthält die quadratische Form nicht nur die Quadrate dx_μ^2 (also $dx_\mu \cdot dx_\mu$), sondern auch $dx_\mu \cdot dx_\nu$, die paarweisen Produkte der verschiedenen Koordinatendifferentiale. In der euklidischen Geometrie sind letz-

tere Null. Aber in anderen Geometrien gehen sie in das Polynom mit unterschiedlichen Koeffizienten ein. Wir bezeichnen die Koeffizienten durch die Buchstaben g mit denjenigen zwei Indizes, die den Indizes der miteinander zu multiplizierenden Koordinatendifferentiale entsprechen: Der Koeffizient beim Produkt $dx_1 dx_1$, also bei dx_1^2, wird also mit g_{11} bezeichnet. Der Koeffizient beim Produkt $dx_1 dx_2$ wäre g_{12} usw. Allgemein gilt somit für $dx_\mu dx_\nu$ als Koeffizient $g_{\mu\nu}$. Nun kann man die Formel aufstellen, die die Abhängigkeit des Abstandes von den Differenzen der Koordinaten in allgemeinerer Form angibt und die auch für schiefwinklige Koordinatensysteme geeignet ist. In dieser allgemeinen Form ist das Quadrat des Abstandes gleich der Summe der Koordinatendifferenzen plus der Summe der Produkte der voneinander verschiedenen Koordinatendifferenzen. In verkürzter Schreibweise sieht diese quadratische Form so aus:

$$dr^2 = \sum_{\mu,\nu=1}^{3} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu .$$

Liegen Orthogonalkoordinaten vor, dann entfallen die Produkte unterschiedlicher Koordinatendifferentiale. Dann ist $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$ und die übrigen sind gleich Null.

Die Einsetzung dieser Werte in die allgemeine Formel ergibt die obengenannte Formel $dr^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$.

Für die spezielle Relativitätstheorie reicht diese Formel, wenn sie für die vierdimensionale Raumzeit erweitert wird, aus. Für die allgemeine Relativitätstheorie ist eine allgemeinere Formel nötig. Bei schiefwinkligen Koordinatensystemen sind die Werte der $g_{\mu\nu}$ ungleich Null und Eins. Wir schreiben die Koeffizienten wie folgt als Tabelle:

$$\begin{matrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} . \end{matrix}$$

Diese neun Koeffizienten machen es möglich, in jedem Punkte des dreidimensionalen Raumes den Abstand zweier beliebig naher Punkte zu bestimmen, also die bei Koordinatentransformationen invarianten Eigenschaften. Diese Koeffizienten bestimmen die Metrik des Raumes und bilden den metrischen Fundamentaltensor.

Die Werte seiner Komponenten zeigen an, durch welches Koordinatensystem die betreffende Mannigfaltigkeit parametrisiert ist. Man kann jede Mannigfaltigkeit von Eigenschaften oder Objekten mit verschiedenen Koordinatensystemen parametrisieren. Man denke an rechtwinklige, schiefwinklige und Polarkoordinaten.

Bei einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit haben wir zehn Koeffizienten $g_{\mu\nu}$, weil von den 16 Komponenten des vierdimensionalen Tensors im gegebenen

Fall (der Tensor ist symmetrisch) sechs Komponenten einander gleich sind:

$$g_{12} = g_{21} \quad g_{13} = g_{31} \quad g_{14} = g_{41},$$
$$g_{23} = g_{32} \quad g_{24} = g_{42} \quad g_{34} = g_{43}.$$

In Analogie zur zweidimensionalen *Ebene*, wo zweidimensionale ebene cartesische Koordinaten möglich sind und wo $g_{\mu\nu}$ Null oder Eins ist, führen wir den Begriff der ebenen vierdimensionalen Mannigfaltigkeit ein, in der $g_{\mu\nu} = 1$, wenn $\mu = \nu$ und $g_{\mu\nu} = 0$, wenn $\mu \neq \nu$ ist.

7. Die Krümmung der vierdimensionalen Welt

Wir gehen von der nur lokalen Bedeutung des Äquivalenzprinzips aus. Eine „ideale" Welt mit einem homogenen Gravitationsfeld wäre mit der realen Welt, in der die Kraftlinien der Gravitationsfelder in sich zurücklaufen, nur in unendlich kleinen Bereichen identisch, so wie gerade und krumme Linien. Als weniger anschauliches Beispiel könnte man auch einen „ebenen" und einen „gekrümmten" Raum mit n Dimensionen anführen.

Eine solche Analogie (sie blieb es nicht lange) wies den Weg zu einem allgemein kovarianten Ausdruck der Naturgesetze. Es war erforderlich, das *lokale* Äquivalenzprinzip durch die Vorstellung der Krümmung des raum-zeitlichen Kontinuums zu ergänzen.

Die Gekrümmtheit des Raumes fordert eine Änderung des metrischen Fundamentaltensors. Darum brauchte Einstein mathematische Mittel, die ihm erlaubten, kontinuierliche Veränderungen des Tensors $g_{\mu\nu}$ beim Übergang von einem Weltpunkt zu einem anderen auszudrücken. Hierzu führte Einstein in seiner Arbeit „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" gewisse Grundbegriffe der Tensoranalysis ein, die für den systematischen Aufbau der Theorie erforderlich waren. Der Tensorkalkül existierte bereits, der Ausdruck „Tensor" allerdings noch nicht. Doch war von Ricci und anschließend von Levi-Cività der „Absolute Differentialkalkül" eingeführt und zur Theorie der Objekte gemacht worden, die in jedem Koordinatensystem eines dreidimensionalen Raumes nicht nur durch drei Funktionen wie die Vektoren, sondern durch eine größere Zahl räumlicher Funktionen festgelegt sind. Es bestanden auch schon Vorstellungen über derartige Objekte im vierdimensionalen Raum. Als Ricci und Levi-Cività ihren absoluten Differentialkalkül schufen, fühlten die Mathematiker, daß die verallgemeinerten Begriffe, die aus der Vektoranalysis entstanden waren, erlauben würden, sich physikalische Gesetzmäßigkeiten in einer mathematischen Form vorzustellen, die man mittels der Vektorbegriffe erfaßt. In der Tat, 1914 bis 1916 machte Einstein Tensorkalkül und Tensoranalysis zu einem wirkungsvollen Werkzeug physikalischer Forschung.

Die Tensoranalysis mußte vor allem die Veränderungen der Komponenten des metrischen Fundamentaltensors ausdrücken. In nichteuklidischen Räumen verändern sie sich im allgemeinen stetig. Wenn die Koeffizienten in allen Raumpunkten konstante Werte haben, die ungleich Null oder Eins sind, so spricht man von einem Riemannschen Raum. Dieser ist durch eine gleich-

förmige Krümmung charakterisiert. Um einen Riemannschen Raum *im engeren Sinne* handelt es sich, wenn er eine konstante *positive* Krümmung hat. Ein anschauliches Bild hierfür ist die Oberfläche einer Kugel. In ihr gehen die Theoreme der zweidimensionalen euklidischen Geometrie in die Theorie der Riemannschen Geometrie über. Aus den Geraden werden kürzeste Verbindungslinien auf der Kugeloberfläche, sogenannte geodätische Linien. Zu ihnen zählen zum Beispiel der Äquator und die Meridiane. Auf eine solche Linie kann man von einem Punkt aus mehrere Senkrechte fällen (etwa vom Pol auf den Äquator).

Das Problem der Krümmung eines n-dimensionalen, nichteuklidischen (in Sonderheit Riemannschen) Raumes entfernt uns noch weiter vom „Weltbild" im üblichen Sinne. Wir erinnern nur daran, daß sogar in der Geschichte der Malerei bei Beschreibungen von Gemälden nicht nur von deren Thema (Sujet), Komposition, Kolorit usw. berichtet wird, sondern auch von den Mitteln, die der Künstler benutzt hat. So werden auch wir uns bemühen, eine Vorstellung von dem mathematischen Apparat zu vermitteln, der es Einstein ermöglichte, 1916 zu seiner neuen Theorie der Gravitation zu kommen. Zu diesem Apparat gehörte auch die Differentialgeometrie gekrümmter Räume, deren Eigenschaften wir nun in allgemeiner Form skizzieren.

Einstein benutzte Ausdrücke, die das Maß der „Nichteuklidizität" des Raumes bestimmen. Diese Größen, Koeffizienten der „Nichteuklidizität" werden durch Christoffelkoeffizienten genannte Symbole dargestellt. Diese sind in der euklidischen Geometrie gleich Null. Im Riemannschen Raum sind sie entsprechend der Krümmung unterschiedlich und von Null verschieden. Im Zusammenhang damit wird ein Begriff eingeführt, den die euklidische Geometrie nicht kennt — die kovariante Ableitung.

Beim Übergang von einem Raumpunkt zu einem anderen ändert sich im allgemeinen der Vektor, der die betreffende physikalische Veränderliche darstellt, und diese Veränderung wird durch eine gewöhnliche Ableitung ausgedrückt. Aber bei der Translation eines Vektors im gekrümmten Raum können sich die Vektorkomponenten wegen der Raumkrümmung ändern. Um eine vom Koordinatensystem unabhängige Veränderung des Vektors festzustellen, errechnen wir aus der gewöhnlichen Ableitung eine Größe, die von der Raumkrümmung abhängt (von den Werten der Christoffelschen Symbole, die in den Ausdruck für die Krümmung eingehen), und erhalten eine kovariante Ableitung. Wenn diese gleich Null ist, ändert sich der Vektor nur infolge der Raumkrümmung. Solch ein Vektor fällt der Richtung nach mit einer geodätischen Linie im betreffenden Raum zusammen.

Das Auffinden der kovarianten Ableitung nennt man kovariantes Differenzieren. Was stellt dieses bezüglich der Unabhängigkeit physikalischer Objekte von ihrer mathematischen Parametrisierung dar? Hier geht die Geschichte der mathematischen Mittel in die Geschichte der physikalischen Ideen über. Im gegebenen Fall geht es darum, allgemein kovariante Gleichungen zu erhalten, das heißt Gleichungen, die von Transformationen der Koordinatensysteme unabhängig sind.

Die gewöhnliche Ableitung eines Vektors ist nicht invariant gegenüber *allgemeinen* Transformationen. Sie fällt mit der kovarianten Ableitung im Falle

cartesischer Koordinaten zusammen, die im euklidischen Raum immer eingeführt werden können. Die kovariante Ableitung geht in diesem Fall in die gewöhnliche Ableitung über, weil das Glied mit dem Christoffel-Koeffizienten Null ist. Die kovariante Ableitung, im allgemeinen mit der gewöhnlichen nicht zusammenfallend, entspricht einer nichteuklidischen Geometrie und allgemeineren, krummlinigen Koordinaten. Folglich erlaubt die kovariante Differentiation, noch beständigere, transformationsunabhängige Beziehungen zu finden, in der Entwicklung einer invarianten Erfassung physikalischer Objekte also noch einen Schritt weiter zu gehen.

Die kovariante Differentiation erlaubt, Veränderungen der geometrischen Form, die aus Veränderungen des physikalischen Objektes herrühren, von Veränderungen der geometrischen Gestalt zu unterscheiden, die mit der Veränderung der Metrik von Punkt zu Punkt zusammenhängen. Bei der Veränderung einer physikalischen Größe wird eine „Korrekturveränderung" als Folge der Raumkrümmung zugefügt.

Wenn erstere Veränderung gleich Null ist, so hängt ihre Veränderung in krummlinigen Koordinaten gänzlich von der Raumkrümmung ab. Eine geodätische Linie ist eine Linie, deren Richtung in jedem Punkte gänzlich durch die Raumkrümmung bestimmt wird und keinerlei „absolute" Veränderung erfährt.

Wir können uns den rein mathematischen Begriff der kovarianten Ableitung dadurch veranschaulichen, daß wir zur „physikalischen" Veränderung eines Vektors eine Größe zufügen, die von einer willkürlichen, krummlinige Koordinaten einschließenden Parametrisierung des physikalischen Objektes abhängt. Solange wir uns nur auf den Übergang in das Gebiet der allgemeinen Relativitätstheorie vorbereiten, können wir uns mit einer solchen Vorstellung begnügen. Doch dieser Übergang selbst erfordert die physikalische Interpretation der Christoffelschen Symbole, die Angabe der physikalischen Erscheinungen, die die Einführung zusätzlicher Glieder in den Differentialen und Ableitungen bedingen; mit einem Wort: eine physikalische Interpretation der Raumkrümmung.

Um den physikalischen Sinn der Christoffelschen Symbole aufzuklären, muß man zunächst ihre Beziehung zum metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ zeigen. Dessen Veränderungen ergeben sich einzig aus der Raumkrümmung. Wenn man aus der Differenz zweier beliebig naher Tensoren $g_{\mu\nu}$ die Differenz ausrechnet, die sich bei Paralellverschiebung infolge der Krummlinigkeit der Koordinaten bildet, erhält man daher gar keine Differenz. Bei kovarianter Differentiation verhalten sich die $g_{\mu\nu}$ als Konstante, ihre kovarianten Ableitungen sind Null. Die Christoffelsymbole werden aus den gewöhnlichen Ableitungen des Tensors $g_{\mu\nu}$ gewonnen. Darin liegt nichts Überraschendes: Die Veränderungen des metrischen Tensors sind ein Maß für die Raumkrümmung, die Ableitungen von $g_{\mu\nu}$ drücken das Maß der Raumkrümmung in den verschiedenen Richtungen aus.

Die Christoffelschen Symbole erlauben, einen Ausdruck zu finden, der jede mögliche Krümmung in jeder möglichen Richtung und die dementsprechende Änderung des metrischen Tensors g im gegebenen Punkt mißt. Diesen Ausdruck nennt man Krümmungstensor oder auch Riemann-Christoffelschen Tensor. Dieser Begriff tauchte bei Riemann 1854 in seiner Schrift „Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen" (veröffentlicht 1868) auf, bei Christoffel 1869.

Im zweidimensionalen Raum kann man den Tensor sehr anschaulich interpretieren. Um den Begriff des mehrdimensionalen Raumes zu erklären, sprach Helmholtz einmal von zweidimensionalen Wesen, die auf einer Kugeloberfläche leben. Seitdem erscheinen diese Wesen häufig in verschiedenen Büchern als ein Völkchen mit eigener Geographie, Astronomie und vor allem Geometrie. Sie könnten die Summe der Innenwinkel von Dreiecken messen, die sich auf ihrer Kugeloberfläche befinden. Diese Summe ist in der Ebene 180°, auf der Kugel ist sie größer. Die zweidimensionalen Wesen könnten daher den nichteuklidischen Charakter ihrer Welt feststellen und als Maß der „Nichteuklidizität" ihre Krümmung bestimmen.

Können wir analoge Messungen der Krümmung unserer dreidimensionalen Welt durchführen? An sich läßt der dreidimensionale Raum solche Messung nicht zu, wohl aber das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum. Es weicht von den Gesetzen der euklidischen Geometrie ab, und diese Abweichungen beobachten wir in den Erscheinungen der Schwere. Die Gravitationstheorie erlaubt daher, mit physikalischen Methoden zu entscheiden, ob die Geometrie Euklids oder die Riemanns die Wirklichkeit genauer beschreibt. Darum ist Einsteins allgemeine Relativitätstheorie in gewissem Sinne eine physikalische Geometrie.

8. Gravitation

Die Erklärung des 300 Jahre alten Rätsels der Identität von träger und schwerer Masse durch das Bild der Äquivalenz von Schwere und Beschleunigung war eine hervorragende Leistung. Die Entwicklung einer strengen Krümmungstheorie der Welt und die Entdeckung, daß eine allgemeine kovariante Auffassung der physikalischen Gesetze in Tensorgleichungen möglich ist, waren vielleicht noch größere Leistungen. Aber das entscheidende Kettenglied für den Aufbau der allgemeinen Relativitätstheorie bildete die Identifizierung der Weltkrümmung mit der Gravitation. Die Äquivalenzvorstellung besitzt ihren eigenen physikalischen Charakter und dient als Verallgemeinerung der alten Galilei-Newtonschen Feststellung der Gleichheit von träger und schwerer Masse und der neuen, aus der Elektrodynamik erwachsenen Vorstellung über die Lichtausbreitung. Die Kovarianz der Gleichungen dagegen basiert auf einer gewissen Systematisierung und Entwicklung eigener mathematischer Begriffe und Methoden. Die Identität von metrischen und Schwerefeldern, also der Zusammenhang zwischen Metrik und Verteilung der Massen im Raum, ist keine physikalische Idee im alten Sinn mehr, aber auch keine spezifisch mathematische. Sie ist der physikalischen Geometrie zuzuordnen. Einstein fand in der Schwere die physikalische Erscheinung, die anzeigte, welche Metrik der Raum hat. Er schuf die Möglichkeit, die Geometrie der Welt physikalisch zu untersuchen, sie damit zu einer physikalischen Wissenschaft zu machen, in der experimentelle Kriterien gelten.

Die physikalische Interpretation der Nichteuklidizität oder der Krümmung des vierdimensionalen Raumes und der mit ihr verbundenen Begriffe beruht auf folgender Vorstellung: Ein freies Teilchen bewegt sich so, daß seine Weltlinie

zwischen zwei Weltpunkten, die voneinander durch den unendlich kleinen Abstand ds entfernt sind, eine kürzeste Linie ist. Weil der Raum der speziellen Relativitätstheorie euklidisch ist, ist in ihm die kürzeste Linie eine Gerade. Wenn wir den dreidimensionalen räumlichen Schnitt x_1, x_2, x_3 der vierdimensionalen Welt nehmen, so sehen wir die räumliche dreidimensionale Projektion der Weltlinie des freien Teilchens als eine Gerade. Dies bedeutet auch die seit Descartes bekannte Geradlinigkeit der kräftefreien Bewegung. In den raumzeitlichen Bewegungsdarstellungen längs den räumlichen Achsen sind die Projektionen der Weltlinie ebenfalls Geraden. Dies bedeutet die schon seit Galilei bekannte Gleichförmigkeit kräftefreier Bewegungen.

Nun wenden wir uns einem Teilchen zu, das sich in einem Gravitationsfeld bewegt. Das Wesen der allgemeinen Relativitätstheorie besteht in der Behauptung, daß die Bewegung des Teilchens im Schwerefeld der Bewegung eines freien Teilchens entspricht und längs einer kürzesten Weltlinie erfolgt. Die Schwere bedeutet nur einen anderen Ausdruck für das Element ds dieser Linie. Genauer gesagt bildet die Weltlinie des Teilchens im Schwerefeld eine geodätische Linie in einer nichteuklidischen Raum-Zeit-Welt. Der nichteuklidische Charakter dieser Welt zeigt sich im Übergang vom Ausdruck

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu=1}^{4} g_{\mu}\, dx_{\mu}\, dx_{\nu},$$

wobei $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$ und $g_{\mu\nu} = 0$, wenn $\mu \neq \nu$ zum selben Ausdruck

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu=1}^{4} g_{\mu\nu}\, dx_{\mu}\, dx_{\nu},$$

wobei $g_{\mu\nu}$ eine Funktion der Koordinaten ist.

Im allgemeinen ist die geodätische Linie keine Gerade, ebensowenig wie ihre Projektion auf $x_1 x_2 x_3$. Diese räumliche Krümmung entspricht der normalen Beschleunigung (im einfachsten Fall zum Zentrum hin). Die Projektion auf die Oberflächen $x_1 x_4$, $x_2 x_4$, $x_3 x_4$ können gleichfalls gekrümmte Linien sein (tangentiale Beschleunigung). In der Mechanik der speziellen Relativitätstheorie wird weitgehend die Analogie zwischen dreidimensionalem Raum $x_1 x_2 x_3$ und vierdimensionaler pseudoeuklidischer Welt $x_1 x_2 x_3 x_4$ benutzt. Die Rolle, die die Zeit in der klassischen Mechanik gegenüber Weltkoordinaten nach dem Intervall $x_1 x_2 x_3$ spielte, übernimmt in $x_1 x_3 x_3 x_4$ das Weltintervall. Die vier Ableitungen der Weltkoordinaten nach dem Intervall nennt man Komponenten der vierdimensionalen Geschwindigkeit. Die Ableitungen der vierdimensionalen Geschwindigkeit nach dem Weltintervall, also die zweiten Ableitungen nach den Koordinaten, bezeichnet man als vierdimensionale Beschleunigungen. Die Bewegungsgleichung für ein freies Teilchen erhält man, indem man die vierdimensionalen Beschleunigungen gleich Null setzt. Das Wesen dieser Einsteinschen Theorie besteht darin, daß im Fall eines Gravitationsfeldes diese Gleichung auf krummlinige vierdimensionale Koordinaten erweitert wird.

Die Christoffelschen Symbole stellen in der neuen Theorie der Gravitation die Feldstärken eines Kraftfeldes und die Ableitungen des Tensors $g_{\mu\nu}$ die Potentiale des Gravitationsfeldes dar. Wir könnten hier die Ausdrücke „Kraft", „Feldstärke" und „Potential" in Anführungszeichen setzen, weil in der klassischen Physik seit Newton (bei Galilei gab es das noch nicht) eine Kraft als etwas den geodätischen Linien des Raumes gegenüber Fremdes betrachtet wird. Hier aber erfolgt die Bewegung des freien Teilchens und die Bewegung im Schwerefeld gleicherweise auf geodätischen Linien, nur sind diese im ersten Falle Geraden, im zweiten normalerweise Kurven.

Die Komponenten des metrischen Fundamentaltensors spielen also hier die Rolle der Potentiale, während seine Ableitungen die Feldstärke, ausgedrückt durch die Christoffel-Koeffizienten, bestimmen.

Diese physikalische Interpretation ist, so unerwartet sie auch scheinen mag, ganz natürlich. Wenn der Krümmungstensor Null ist, sind auch die Christoffel-Koeffizienten gleich Null, und die Komponenten $g_{\mu\nu}$ sind konstante Größen. Dann entspricht die vierdimensionale Geometrie der Welt einem homogenen Gravitationsfeld, das man eliminieren kann. Wenn der Krümmungstensor ungleich Null ist und die Komponenten $g_{\mu\nu}$ veränderliche Größen sind, dann entspricht die Weltgeometrie einem nicht eliminierbaren Gravitationsfeld. Es liegt nahe, anzunehmen, die Christoffel-Koeffizienten seien als Abbilder der Komponenten realer Gravitationsfelder und die $g_{\mu\nu}$ als Abbilder der Potentiale der Gravitationsfelder aufzufassen. Dann bleibt die kovariante Form der Gleichung für die freie Bewegung eines materiellen Punktes auch für den Fall gültig, daß man im Gravitationsfeld kein Koordinatensystem auswählen kann, in dem die Koeffizienten $g_{\mu\nu}$ die Werte der speziellen Relativitätstheorie annehmen.

Darin besteht das Programm, das in den ersten Paragraphen der „Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" skizziert und anschließend durchgeführt wird.

Die Werte der Komponenten des metrischen Tensors $g_{\mu\nu}$ in den verschiedenen Punkten der Raumzeit konstituieren das sogenannte g-Feld, das sowohl die Bewegungen schwerer Körper als auch die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung und die Metrik von Raum und Zeit bestimmt.

Das ist der Grundinhalt der allgemeinen Relativitätstheorie. Sie gehört zu jenen großen Verallgemeinerungen, die durch ihre Kühnheit und Weite die Menschen immer in Erstaunen versetzen werden, genau wie Galileis Gedanke von der kräftefreien Bewegung, Lobačevskijs Gedanke, daß die geometrischen Eigenschaften des Raumes von den physikalischen Prozessen in ihm abhängen, und Einsteins Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Veränderlichkeit der räumlichen und zeitlichen Maßstäbe. Zu ihnen gehört auch die Identität der metrischen und der Gravitationsfelder.

In seiner allgemeinen Relativitätstheorie formuliert Einstein das allgemeine Prinzip, welches erlaubt, ein physikalisches Gesetz mit Begriffen und Größen auszudrücken, die von der Parametrisierung unabhängig sind, und das sogleich zum Inhalt dieses Gesetzes vorstößt. Die Krümmung der Raumzeit beziehungsweise die Schwerefelder hängen von der Existenz schwerer Massen ab. Schwere

Massen sind den trägen Massen gleich und folglich der Gesamtenergie proportional. Daraus kann man schließen, daß das metrische Feld von der Gesamtenergie abhängt, die dieses Feld aus stofflichen Körpern und elektromagnetischen Feldern geschaffen hat. In Einsteins Gleichungen für das Gravitationsfeld stehen links die Komponenten des Krümmungstensors der Raumzeit, rechts die Komponenten des Energie-Impuls-Tensors. Einstein ergänzte diese Gleichungen, indem er den Krümmungstensor $R_{\mu\nu}$ mit dem Energie-Impuls-Tensor durch vier Beziehungen verband, die die Fundamentaleigenschaft der Gleichung ausdrücken: sie bleibt beim Übergang zu einem anderen vierdimensionalen Bezugssystem gültig. Solch ein Übergang kann sowohl längs der Achsen x_1, x_2 und x_3, also im Raum, wie auch in der Zeit (also längs x_4) erfolgen. Es geht somit um die Kovarianz der Gleichung des Gravitationsfeldes in bezug auf räumliche und zeitliche Verschiebungen. Die genannten vier Ausdrücke entsprechen vier Erhaltungsgesetzen: denen der drei Komponenten des Impulses und der Erhaltung der Energie.

Im Schlußkapitel dieses Buches werden wir im Zusammenhang mit einer Neueinschätzung der Erhaltungssätze für Impuls und Energie ausführlich auf diesen Teil der allgemeinen Relativitätstheorie eingehen.

Später gelang es Einstein und seinen Schülern sowie auch V. A. Fok, aus den Gleichungen des Gravitationsfeldes die Gleichungen für die Bewegung eines materiellen Punktes herzuleiten. In der klassischen Physik sind die Feldgleichungen und die Bewegungsgleichungen voneinander unabhängig. Die Unabhängigkeit beider Gleichungen drückt sich auch in ihrer Linearität aus. Wir betrachten das elektromagnetische Feld als unabhängig vom Teilchen, das sich infolge seiner Einwirkung in ihm bewegt. Dabei unterteilen wir das Feld in zwei Teile: in das Feld des betrachteten Teilchens und in das Feld aller übrigen Teilchen. Wir berücksichtigen nur das Feld, das im gegebenen Punkt vorliegen würde, wenn es das betrachtete Teilchen nicht gäbe. Dabei hängt das elektromagnetische Feld, das auf das Teilchen wirkt, von den Strömen und Ladungen linear ab. Die Bewegung des Teilchens verändert ihrerseits das Feld nicht, und darum sind auch ihre Gleichungen linear. In Einsteins Theorie jedoch sind die Feldgleichungen nicht linear: die Schwerefelder wirken aufeinander ein. Daher kann man auf die Unabhängigkeit der Feld- und Bewegungsgleichungen verzichten und die Bewegungsgleichungen aus den Feldgleichungen ableiten. Einstein und Grommer stellten 1927 diese Aufgabe.[39] In den Jahren 1937—1939 wurde sie von Einstein, Infeld und Hofmann gelöst.[40] Gleichzeitig kam auch V. A. Fok zu dieser Entdeckung.[41] Er entwickelte die Bewegungsgleichungen nicht für materielle Punkte, sondern für Körper endlichen Volumens.

[39] A. Einstein/J. Grommer, Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz, in: Sitzungsber. der Preußischen Akademie der Wissenschaften, phys.-math. Klasse, 1927, S. 2—13.

[40] A. Einstein/L. Infeld/B. Hofmann, Gravitational equations and the problems of motion, in: Annals of Mathematics, Bd. 39 (1938), S. 65—100; ebenda, Bd. 41 (1940), S. 455 bis 464.

[41] V. A. Fok, in: Ж. Э. Т. Ф. т. 9 (1939) S. 375.

9. Die Überprüfung der allgemeinen Relativitätstheorie

Die Genauigkeit der neuen Gravitationstheorie und der nur approximative Charakter des Newtonschen Gesetzes wurden durch die beobachtete Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne bestätigt. Der entsprechende theoretische Beweis und die Entdeckung, daß Licht schwere Masse besitzt, ist notwendiger Ausgangspunkt der allgemeinen Relativitätstheorie. Das Gravitationsfeld kann man sich nur deshalb als Krümmung der Raumzeit vorstellen, weil es auf alle physikalischen Objekte gleichartig einwirkt, unabhängig von den diese Objekte charakterisierenden Konstanten. Alle physikalischen Prototypen einer Geraden, alle geraden Weltlinien, die der kräftefreien Bewegung eines Teilchens entsprechen, erleiden unabhängig von der Masse des Teilchens und der Ausbreitung jedes Punktes der Front einer Lichtwelle ein und dieselbe Einwirkung, und deshalb kann man sich solch eine Einwirkung als Raum-Zeit-Krümmung vorstellen. Würde die Schwere auf das Licht nicht wirken, so könnte man sie nicht als eine Veränderung der geometrischen Eigenschaften der Raumzeit auffassen, und das Äquivalenzprinzip würde ungültig: Im beschleunigten Käfig würde das Licht seine Richtung ändern, aber im ruhenden, der Gravitation unterworfenen Käfig nicht. Damit wäre der absolute Charakter seiner Ruhe bewiesen.

Nahe einer schweren Masse wird ein Lichtstrahl gekrümmt, weil der Abschnitt der Wellenfront, der näher an der Masse vorbeiläuft, mehr zurückgehalten wird als ein fernerer Abschnitt. Dadurch ändert die Welle ihre Richtung. Diese Ablenkung wurde für einen Strahl, der an der Sonnenoberfläche vorbeiläuft, zu 1,75″ errechnet, wenn man Einsteins Gesetz zugrunde legte. Wenn man nur einen Teil der Krümmung, die Anziehung zur Sonne berücksichtigt — das entspricht dem Gesetz Newtons —, erhält man eine doppelt so kleine Ablenkung von 0,87″.

So wurde eine Größe gefunden, die eine Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie als Ganzes gestattete. Eine solche Prüfung entspricht der Ausmessung der Winkelsumme eines sphärischen Dreieckes durch einen ebenen Bewohner einer Kugeloberfläche. Die Ablenkung des Lichtes im Schwerefeld der Sonne zeugt von der Nichteuklidizität der Welt, also von der Richtigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie. Wenn die Ablenkung an der Sonnenoberfläche etwa 1,75″ ist, so kann man sagen, daß Einsteins Gravitationsgesetz eine genauere Beschreibung der Wirklichkeit gibt als das Newtonsche (das freilich für die meisten Erscheinungen ausreicht).

Eine derartige Prüfung erfolgte am 29. Mai 1919 unter Leitung des Astronomen Eddington. Der Bericht über die astronomischen Expeditionen des Jahres 1919 in Eddingtons Buch „Raum, Zeit und Schwere“ ist „Schweres Licht“ betitelt. Er behandelt im wesentlichen die Wägung eines Lichtstrahles. Ein Punkt der Wellenfront des Lichtes, das an der Erdoberfläche vorbeigeht, fällt nach Newton um 5 Meter (nach Einstein um 10 Meter pro Sekunde) genau wie ein horizontal abgefeuertes Geschoß, das sich wegen seiner Schwere nach einer Sekunde etwas unter der Abschußhorizontalen befindet. Aber das Licht hat eine Geschwindigkeit von 300000 km/s, daher kann eine Krümmung seines Weges auf der Erde auch mit den feinsten Messungen nicht entdeckt werden. Nahe der Sonne ist die Gravi-

tation 27mal stärker, und die Lichtkrümmung erreicht Werte in der Größenordnung von einer Bogensekunde, was astronomisch bereits erfaßbar ist.

Das Schema, das dem Buch Eddingtons entnommen ist[42], zeigt, daß der Astronom auf der Erde (Punkt E) den Stern P nach Punkt P' verschoben erblickt, weil der Lichtstrahl dieses Sternes $PQFE$ nahe der Sonnenoberfläche (S) seine Richtung beträchtlich verändert hat.

Sterne nahe der Sonnenscheibe kann man nur während einer Sonnenfinsternis beobachten. Gerade bei der Verfinsterung am 29. Mai 1919 mußte die Sonnenscheibe durch eine Gruppe recht heller Sterne gehen, worauf Eddington schon 1917 die englischen Astronomen aufmerksam gemacht hatte. Er selbst begab sich 1919 nach langer Vorbereitung der Expedition nach der Insel Principe im Golf von Guinea. Eine andere Expedition zog nach Sobral in Nordbrasilien, das gleichfalls vom Kernschatten des Mondes überstrichen wurde.

Auf der Insel Principe gelang es — trotz wolkigem Wetter —, mit Hilfe eines Fernrohres 16 Aufnahmen mit Aufnahmezeiten zwischen zwei und zwanzig Sekunden zu machen. Auf einer der Aufnahmen waren deutlich die Bilder von fünf Sternen nahe der Sonne zu sehen. Der Film wurde auf einen anderen Film gelegt, auf dem derselbe Himmelsabschnitt aufgenommen worden war, doch in

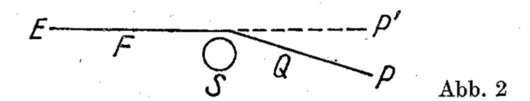


Abb. 2

Abwesenheit der Sonne. Die Verschiebungen der Sternbilder gegeneinander wurden mit einem Koordinatenmeßgerät vermessen. In Sobral hatte man bei klarem Himmel mittels zweier Fernrohre die Verfinsterung fotografiert. Die Resultate, die man mit dem einen der Teleskope erhalten hatte, unterschieden sich von den Beobachtungen auf Principe; sie wurden jedoch aus verschiedenen Gründen angezweifelt. Zum Beispiel führte man die Erwärmung der Apparatur durch die Sonnenstrahlen als solchen Grund an. Die zweite Serie der brasilianischen Fotografien zeichnete sich durch große Genauigkeit aus. Von ihnen erwartete man voller Ungeduld die Entscheidung. Und sie gaben dann auch tatsächlich die endgültige Antwort auf eine der grundlegenden Fragen der Wissenschaft. Die beobachteten Abweichungen betrugen in Sobral $1{,}98 \pm 0{,}12''$ und in Principe $1{,}61 \pm 0{,}30''$. Beide bestätigten den Wert von $1{,}75''$, der sich aus Einsteins Gesetz ergab. Den um das zweifache kleineren Wert, der Newtons Gesetz entspräche, schlossen sie aus.

Die Expeditionsresultate von 1919 beschleunigten die Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie wesentlich. Die folgende Periode ist durch Untersuchungen auf breiterer Front gekennzeichnet. Die Mehrheit der Physiker schloß sich der neuen Idee an, und man begann sie kollektiv auszuarbeiten. Aber nicht nur die beobachtete Lichtstrahlenablenkung im Schwerefeld der Sonne war eine

[42] A. S. Eddington, Raum, Zeit und Schwere. Ein Umriß der allgemeinen Relativitätstheorie, Braunschweig 1923, S. 117.

Bestätigung der allgemeinen Relativitätstheorie. Sie erklärte gleichzeitig die dem Newtonschen Gravitationsgesetz widersprechenden Anomalien der Bewegung des Merkurs.

Die Abweichungen sind äußerst geringfügig. Bei der Untersuchung des Verhaltens von Lichtstrahlen ergaben sich die Schwierigkeiten aus der großen Geschwindigkeit des Lichtes (verglichen mit „gewöhnlichen" Geschwindigkeiten). Der Ablenkungswinkel der Lichtstrahlen war im Schwerefeld der Sonne deshalb klein, weil die sekundliche Fallstrecke des Lichtes zur Sonne hin nur einige Meter beträgt. Das ist sehr wenig im Verhältnis zur Distanz, die das Licht in dieser Sekunde zurücklegt. Im Gegensatz hierzu sind die Abweichungen der Planeten von den Bewegungen, die durch Newtons Gesetz vorausgesagt wurden, deshalb klein, weil ihre Geschwindigkeit verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit gering ist. In beiden Fällen müssen die Beobachtungen die Schranke überwinden, welche die Welt der langsamen Bewegungen von der Welt der schnellen Bewegungen scheidet. Für einen Teil der Planetenbewegungen war im 18. und 19. Jahrhundert der Mangel an genauen Geräten durch jahrzehntelange Sammlung der Abweichungen bei den Planetenumläufen kompensiert worden. Auf diese Weise sind die Abweichungen der Merkurbahn von der Ellipsenbahn entdeckt worden.

Newtons Gravitationsgesetz behauptet, daß sich ein Planet streng auf einer Ellipse bewege. Einsteins Gesetz sagt eine kleine Abweichung voraus: Die Ellipsenbahn läuft nicht exakt in sich zurück, sie dreht sich jährlich ein wenig in Richtung der Planetenbewegung. Diese jährliche Periheldrehung beträgt, wenn man einen vollen Umlauf des Perihels als Einheit nimmt, $3 \cdot v^2/c^2$, wobei v die Geschwindigkeit des Planeten und c die des Lichtes bezeichnet. Für Merkur, einen Planeten mit ausgeprägter Bahnexzentrizität, die eine exakte Perihelbestimmung gestattet, und mit relativ hoher Umlaufgeschwindigkeit, entspricht obiger Bruch einer Periheldrehung von 43″ pro Jahrhundert. Der beobachtete Wert ist 574″ pro Jahrhundert, von ihm ergeben sich 532″ aus Störungen durch die anderen Planeten. Die Differenz 42″ wird mit großer Genauigkeit durch Einsteins Theorie erklärt.

Es gibt noch einen dritten Weg, die nichteuklidischen Eigenschaften der Raumzeit zu erforschen und die Gravitationsgesetze Newtons und Einsteins zu prüfen — den Weg der direkten Messung des Intervalls $d\tau$. Er besteht in einem Vergleich der Frequenzen, die eine bestimmte Spektrallinie in unterschiedlichen Gravitationsfeldern zeigt. In der vierdimensionalen Welt stellen Anfang und Ende einer Schwingung zwei voneinander um $d\tau$ entfernte Weltpunkte dar. Stellen wir uns nun zwei Atome vor, die Licht ein und derselben Frequenz aussenden, was derselben Spektrallinie entspricht. Eins der Atome befinde sich auf der Sonne, ein anderes auf der Erde. Das Intervall der Schwingung auf der Sonne, wo das Schwerefeld stärker ist, wird größer sein als das auf der Erde: Die Gravitation krümmt den Abschnitt der Weltlinie zwischen Anfang und Ende der Schwingung. Dementsprechend verlängert sich die Wellenlänge des emittierten Lichtes. Die Spektrallinie im Sonnenspektrum wird also, verglichen mit der gleichen Spektrallinie einer irdischen Lichtquelle, nach größeren Wellenlängen, also nach dem

roten Ende des Spektrums hin, verschoben sein. Spektroskopische Beobachtungen haben im allgemeinen die Behauptung einer solchen „Rotverschiebung" bestätigt, doch eine Übereinstimmung der beobachteten mit den *aus der* Einsteinschen Theorie errechneten Werten ist bis jetzt noch nicht erreicht worden.

Für Sterne mit höherer spezifischer Dichte als die Sonne ist die Gravitationsverschiebung der Spektrallinien leichter zu beobachten. Zum Beispiel ist die Dichte des Siriusbegleiters, der zur Klasse der weißen Zwergsterne gehört, 30mal größer als die der Sonne. Bei diesem Trabanten ist auch eine Gravitationsverschiebung durch Beobachtung nachgewiesen, doch auch hier gibt es keine quantitative Übereinstimmung mit den Schlüssen aus der Theorie Einsteins.

Die experimentelle Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie gibt auf die entscheidenden Probleme des wissenschaftlichen Weltbildes Antwort, darum bezeichnen neue Möglichkeiten einer solchen Prüfung wichtige Etappen in der allgemeinen Wissenschaftsgeschichte. Solche prinzipiell neuen Möglichkeiten ergaben sich Ende der fünfziger Jahre.

Im Jahre 1958 hatte Mößbauer gewisse Besonderheiten der Absorption von Gammastrahlen entdeckt, die es erlaubten, die Wellenlängen dieser Strahlen mit großer Präzision zu bestimmen, da der Einfluß des Rückstoßes der emittierenden Kerne ausgeschlossen wurde. Mößbauer fand, daß Atome in Kristallgittern Gammaquanten praktisch rückstoßfrei emittieren. Solche Gammastrahlen haben sehr enge Spektrallinien. Durch Beobachtung der Resonanzabsorption derartiger rückstoßfreier Strahlen kann man winzigste Verschiebungen von Spektrallinien messen. Pound und Rebka verwiesen auf die Möglichkeit, diese Entdeckung zur Messung der Gravitationsverschiebung unter irdischen Bedingungen zu benutzen. Sie beobachteten eine Verschiebung des Kernniveaus in verschiedenen Höhen des Schwerefelds der Erde und bestätigten mit ausreichender Genauigkeit die diesbezüglichen Schlüsse der allgemeinen Relativitätstheorie.

Im Unterschied zur speziellen ist die allgemeine Relativitätstheorie noch nicht in die Lehre vom Mikrokosmos integriert worden, trotzdem wird immer klarer, daß sie zur Lösung von Problemen der Mikrowelt herangezogen werden muß. Doch hat sie bereits die Vorstellungen vom Weltall gewandelt — nicht nur von den Sternen und Galaxien, sondern von dem, was wir das Weltall als Ganzes nennen.

10. Die Welt als Ganzes

Ein Jahr nach Erscheinen des Werkes „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" veröffentlichte Einstein den Artikel „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie".[43] In ihm wird das Weltall als Ganzes betrachtet. Diesen Ausdruck darf man nicht wörtlich nehmen. Es geht um einen Raum, in dem die Abstände zwischen den Milchstraßen unerheblich sind. In der Feldtheorie betrachtet man manchmal die Bedingungen in Punkten, die vom betrachteten System so weit entfernt sind, daß man in ihnen das Feld als Null

[43] A. Einstein, Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, in: Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akademie der Wissenschaften, Jahrg. 1917, S. 142—152.

ansehen kann. Diese Bedingungen nennt man „Bedingungen im Unendlichen". Wenn man diese Bedingungen bei immer weiterer Entfernung von den uns bekannten Milchstraßen studiert, so kann das Gebiet, für das diese Bedingungen gelten, dem ganzen Weltall gleichgesetzt werden. Die Versuche der klassischen Physik, die Bedingungen in unendlichen Fernen zu beschreiben, führten zu Widersprüchen. Wenn man zum Beispiel die Newtonsche Gravitationstheorie auf eine unendliche Welt als Ganzes anwendet, dann werden die auf jeden Körper wirkenden Kräfte unendlich groß. In unserem Weltall wirken aber nur *endliche* Kräfte auf die Körper. Das Newtonsche Gravitationspotential nimmt einen endlichen Wert an, wenn die Materie inmitten eines unendlichen, leeren Raumes auf galaktische Inseln verteilt ist oder wenn die Massendichte schneller als $1/r^2$ nach Null strebt. Im letzteren Falle kann die Gesamtmasse der Materie auch unendlich sein. Das Potential ist dann endlich und geht für das Unendliche gegen Null. Doch diese Vorstellung ist nur mit der klassischen Gravitationstheorie vereinbar, nicht aber mit der klassischen statistischen Theorie. Die unendlich vielen Himmelskörper muß man als eine Art kosmischen Gases betrachten. Aus der kinetischen Gastheorie folgt, daß eine Insel aus derartigen kosmischen Gasen, die von einem unendlichen, leeren Raum umgeben ist, längst verdampft wäre. Die strahlende Materie und sogar ganze Himmelskörper würden die Materieinsel verlassen und sich in den leeren Raum zerstreuen.

Ist das Universum unendlich, so kann man das Gravitationsparadoxon, das heißt die unendlichen Werte des Gravitationspotentials auf zweierlei Art beseitigen. Der erste Weg besteht in der Annahme, daß sich die Dichte der Materie mit steigender Entfernung vermindert. Wenn beim Übergang zu immer größeren Maßstäben dieselbe mittlere Materiedichte erhalten bleibt, erhalten wir für das Gravitationspotential unendliche Werte; ebenfalls wenn bei wachsender Distanz $1/r$ die mittlere Dichte nicht schneller als gemäß $1/r^2$ abnimmt. Jenes Potential nimmt erst dann endlichen Wert an, wenn die Materiedichte schneller als mit $1/r^2$ nach Null strebt. Ein derart steiler Abfall der Dichte ergibt sich bei Annahme einer hierarchischen Weltallstruktur, bei der jedes System Teil eines größeren Systems ist, wobei die Ausmaße der Systeme unbegrenzt wachsen, die mittlere Materiedichte sich aber beim Aufstieg zu immer umfassenderen Systemen unbeschränkt vermindert. Solch ein Weltbild ist schon im 18. Jahrhundert entworfen worden. In der Zeit von 1908 bis 1922 fand Charlier eine quantitative Beziehung zwischen den wachsenden Ausmaßen der Systeme und der Dichteverminderung, bei denen das Gravitationsparadoxon verschwindet.

Der zweite Weg, um unendliche Werte zu beseitigen, ist eine Modifizierung des Newtonschen Gravitationsgesetzes. Man nimmt eine stärkere Abnahme der Schwerkraft mit der Entfernung als das Newtonsche Gesetz an. Diesem Gesetz entspricht die Poissonsche Gleichung

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 4\pi\gamma\varrho$$

für das Gravitationspotential. In ihr bezeichnet ϱ die Massendichte und γ die allgemeine Gravitationskonstante. Ersetzt man die Summe der zweiten Ab-

leitungen nach den Koordinaten durch das Symbol Δ (Laplace-Operator), so nimmt die Gleichung die Form

$$\Delta\varphi = 4\pi\gamma\varrho$$

an.

Neumann und Seeliger vermerkten Ende des 19. Jahrhunderts, daß für die Beseitigung des Gravitationsparadoxons erforderlich ist, in letztere Gleichung eine Größe einzuführen, die das Potential bei Abstandsvergrößerung, aber konstanter Massendichte und unveränderter Gravitationskonstante rascher absinken läßt. Die Gleichung erhält dann die Form:

$$\Delta\varphi - \lambda\varphi = 4\pi\gamma\varrho,$$

wobei λ die sogenannte kosmologische Konstante ist.

Einstein führte an Stelle des Newtonschen Gesetzes ein neues ein. In der Gleichung des Schwerefeldes sind Größen, die die Metrik der Raumzeit, also ihre Krümmung, charakterisieren und den Energie-Impuls-Tensor enthalten. Doch auch Einsteins Theorie stößt im Fall eines unendlichen Weltalls auf eine Reihe von Schwierigkeiten, u. a. auch auf das Gravitationsparadoxon.

Einstein nahm an, der Weltraum sei endlich. Kann man sich das anschaulich vorstellen? Bei einem zweidimensionalen Raum ist dies sehr einfach. Die Kugeloberfläche hat keine Grenzen und trotzdem einen endlichen Flächeninhalt. Wir können uns (natürlich nicht so anschaulich) die Krümmung eines dreidimensionalen Raumes durch eine dreidimensionale Kugeloberfläche vorstellen. Diese ist auch von begrenztem „Flächeninhalt", das heißt Volumen. Es geht dabei *nicht* um die Krümmung der vierdimensionalen Welt in der Umgebung schwerer Massen, sondern um eine Krümmung des gesamten dreidimensionalen Raumes.

Eine solche Auffassung vertrat Einstein in seinem kosmologischen Artikel von 1917. Betrachtet man jenen endlichen Raum innerhalb der vierdimensionalen Welt, so erhält man drei konstant gekrümmte Dimensionen und eine ungekrümmte, die Zeit. Dies erinnert an die Oberfläche eines Zylinders. Eine ihrer Dimensionen ist gekrümmt und in diesem Sinne endlich, die andere ungekrümmt und unendlich. Schreitet man auf ersterer voran, so kehrt man einmal zu seinem Ausgangspunkt zurück. Eine Reise auf der Zylinderoberfläche parallel zur Längsachse führt dagegen ins Unendliche und schließt keine Rückkehr ein. Die räumlich gekrümmte und endliche, zeitlich aber ungekrümmte und unendliche Welt Einsteins heißt daher *zylindrische Welt*.

Welche Krümmung hat aber der Weltraum?

Einstein ging von der Homogenität und Isotropie des Raumes aus. Die Gesamtheit der uns bekannten Fakten verlangt diesen Standpunkt nicht von vornherein. Solange es unmöglich ist, sich nur durch Beobachtungen oder Experimente für eine der verschiedenen Hypothesen über die Struktur der Welt zu entscheiden, kann man nur Schlüsse aus einer dieser Hypothesen ziehen. Am einfachsten ist der Gedanke der Homogenität und Isotropie des gesamten Raumes. Dies bedeutet, daß man eine einheitliche Weltzeit ansetzen darf, für die in jedem Moment die allgemeine Metrik des Raumes überall und in allen Richtungen dieselbe ist. Dem

entspricht eine konstante positive oder negative Krümmung (sie könnte auch Null sein).

Den Raum konstanter positiver Krümmung nennt man *sphärisch*. Eine gewöhnliche Kugel im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum gibt die Grundlage für die anschauliche Vorstellung eines zweidimensionalen Riemann-Raumes ab, weil die Kugeloberfläche eine zweidimensionale Riemannsche Oberfläche ist. Um eine solche Analogie für einen dreidimensionalen Riemannschen Raum ausnutzen zu können, muß man einen *fiktiven* vierdimensionalen Raum und in ihm eine dreidimensionale Kugel — eine isotrope Hyperfläche einführen. Die auf dieser Hyperfläche geltende Geometrie wird der Metrik eines konstant gekrümmten Raumes entsprechen. Einige Bemerkungen zu dieser Geometrie:

Im vierdimensionalen Raum lautet die Gleichung obiger Hyperkugel:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = a^2.$$

Hierbei ist a der Radius dieser Kugel. Er entspricht dem Krümmungsradius des von uns betrachteten isotropen Raumes. Beim Studium der metrischen Eigenschaften der Kugeloberfläche überzeugen wir uns davon, daß auf ihr das Verhältnis von Kreisumfang zu Kreisradius kleiner als 2π ist. Auf sehr kleinen Flächen ist die Abweichung nicht feststellbar, erst bei größeren Kreisen wird sie merklich. Der Kreisumfang wächst auf der Kugeloberfläche nicht proportional dem Radius, sondern langsamer als er und erreicht als Maximalwert $2\pi a$. Bei weiterem Radiuszuwachs nimmt der Umfang wieder ab. Wenn der Radius den Gegenpol, also die Länge πa erreicht hat, wird der Kreis zu einem Punkt. πa ist also die größtmögliche Distanz auf einer Kugel.

Gehen wir nun zum dreidimensionalen Raum mit dem Radius a in einem fiktiven vierdimensionalen Raum über. Er zeigt eine dem eben betrachteten Fall analoge Metrik. Die Geometrie der zweidimensionalen Oberfläche der Kugel mit ihren wachsenden Kreisen ist dabei durch die Geometrie eines dreidimensionalen Riemannschen Raumes mit ständig wachsenden Kugeln zu ersetzen. Deren Oberflächen sind ebenfalls nicht proportional den Kugelradien: anfangs wachsen sie, wenn $r = \pi a/2$, erreichen sie ihr Maximum, und bei $r = \pi a$, dem größtmöglichen Radius im betreffenden Raum, schrumpfen sie zu einem Punkt zusammen. Das Volumen eines solchen positiv konstant gekrümmten Raumes ist endlich. Dieser ist unbegrenzt, gleichfalls analog zur Kugeloberfläche. Dem Radius einer dreidimensionalen Riemannschen Kugel entspricht der Radius eines Kreises auf der Kugeloberfläche, die Oberfläche der ersten dem Umfang des Kreises, das endliche Volumen der Riemann-Kugel dem endlichen Inhalt einer gewöhnlichen Kugeloberfläche. Freilich, eine gewöhnliche Kugeloberfläche befindet sich in einem Raum, der unbestreitbaren physikalischen Sinn hat; die Riemannsche Kugel hingegen muß man sich in einem *fiktiven* vierdimensionalen Raum vorstellen.

Nun zur zweiten Hypothese, wonach der Raum eine konstante negative Krümmung hat. Seine Geometrie heißt hyperbolisch. Sie entspricht der Geometrie Lobačevskijs. 1868 zeigte Beltrami, daß die zweidimensionale Lobačevskijsche Geometrie auf der Oberfläche einer Figur vom Typ des Grammophon-Schall-

trichters verwirklicht ist, so wie die Riemannsche Geometrie auf der Kugel. Eine Oberfläche vom Typ derjenigen eines Schalltrichters heißt Pseudosphäre. Betrachten wir die Oberfläche der Pseudosphäre, ohne vorerst darauf zu achten, wie sie im Raum orientiert und gekrümmt ist. Betrachten wir die von dieser Krümmung unabhängigen Eigenschaften der Figur, die Abstände auf der Oberfläche. Die von der äußeren Orientierung unabhängigen Eigenschaften bilden die innere Geometrie. Die innere Geometrie der Pseudosphäre ist die Geometrie Lobačevskijs. Jetzt stellen wir uns vor, daß die metrischen Eigenschaften des dreidimensionalen Raumes die der hyperbolischen Geometrie sind. Zwischen Körpern sollen also Beziehungen bestehen, die den Beziehungen zwischen zweidimensionalen Figuren auf der Pseudosphäre analog sind, etwa dem Verhältnis zwischen Radius und Oberfläche einer Kugel. In diesem Fall nennt man den Raum pseudosphärisch, so wie man das Riemannsche Analogon einen sphärischen Raum nennt. Die Oberfläche der Kugel ist positiv gekrümmt, die der Pseudosphäre negativ. Die Oberfläche der letzteren wächst — im Gegensatz zur Kugeloberfläche — unbegrenzt. Analog ist auch der pseudosphärische Raum im Unterschied zum Riemannschen unendlich.

Die dritte Hypothese nimmt für einen isotropen Raum eine Nullkrümmung an. In ihm herrschen Beziehungen wie in der euklidischen dreidimensionalen Geometrie.

Einstein schreibt dem Weltraum positive Krümmung und folglich endliches Volumen zu. Der Begriff des endlichen Raumes ist, im Unterschied zum physikalisch nicht vorstellbaren Begriff des begrenzten Raumes, physikalisch gehaltvoll. Stellen wir uns die Bewegung eines Körpers vor, der keine wesentlichen Einflüsse durch lokale Felder erleidet. Er bewegt sich auf einer geodätischen, der Raumkrümmung entsprechenden Linie. Ist die Krümmung in der ganzen Metagalaxis konstant und positiv, so läuft die Bahn in sich zurück. Genauso würde sich das Licht ausbreiten: ein Lichtstrahl würde um die Metagalaxis herumlaufen und könnte ein Bild der Lichtquelle liefern. In diesem Falle wäre nicht ausgeschlossen, daß man zwei Bilder desselben Objektes, zum Beispiel eines Sternes, von zwei entgegengesetzten Seiten her erhielte. Sie würden uns durch zwei Strahlen geliefert, die die Welt auf einer geschlossenen Kurve umlaufen.[44] Wie weit diese Spekulationen auch von den gegenwärtigen Beobachtungsmöglichkeiten entfernt sein mögen, so illustrieren sie doch eine grundsätzliche Möglichkeit empirischer Prüfung für die Behauptung, daß der Raum gekrümmt sei, und damit die physikalische Sinnhaftigkeit des Begriffes Raumkrümmung.

In Einsteins Artikel „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie" wurde die Idee einer allgemeinen positiven Raumkrümmung durch die Annahme einer kosmologischen Konstanten ergänzt, die — nicht feststellbar in planetarischen Dimensionen — bei kosmischen Entfernungen relevant wird. Ohne diese Konstante schien die Stabilität des Weltgebäudes nicht erklärbar, ließ sich kein statisches Modell gewinnen. Jene kosmologische Konstante führte

[44] Vgl. M. Born, Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen, Berlin 1921, S. 256.

Einstein in die Gleichungen des Gravitationsfeldes ein, indem er den die Raumzeit-Krümmung bestimmenden Größen Zusatzglieder zufügte. Es waren die Werte des metrischen Tensors, multipliziert mit der kosmologischen Konstante λ. Eine derartige Annahme ermöglichte Einstein, ein statisches Universum zu finden, das heißt eine von der Zeit unabhängige Lösung der Gleichungen des Gravitationsfeldes für einen geschlossenen Raum mit einer von Null verschiedenen mittleren Materiedichte.

Die kosmologische Konstante in den Gleichungen Einsteins hat einen anderen Sinn als die Konstante, die Neumann in die klassischen Gleichungen eingeführt hatte. Die kosmologische Konstante Einsteins ist keine Modifikation des r^{-2} Gesetzes der Gravitation, sondern bedeutet, daß im Kosmos neben der Schwere noch eine andere Kraft wirkt. Wenn die kosmologische Konstante kleiner als Null ist, handelt es sich um eine Anziehungskraft, wenn sie größer als Null ist, um eine Abstoßungskraft.

Einstein führte in die Gleichungen eine *positive* kosmologische Konstante ein, nahm also eine Abstoßungskraft an, die der Gravitation das Gleichgewicht hielt und dem Weltall einen statischen, zeitunabhängigen Charakter garantierte.

Ebenfalls im Jahre 1917 fand de Sitter eine Lösung der Einsteinschen Gleichungen des Gravitationsfeldes, gleichfalls mit kosmologischer Konstante, für ein stofffreies Universum. Diese Lösung hing solange *nicht* von der Zeit ab, wie man ein leeres Weltall annahm, doch sobald man Massen mitberücksichtigte, hörte die Zeitunabhängigkeit auf: Die Massen begannen sich gewissermaßen gegenseitig abzustoßen, und das Weltall verlor seine Stabilität. So entstand bei de Sitter der Gedanke eines nichtstationären Weltalls, er verdichtete sich jedoch nicht zu einer Hypothese. Ein radikaler Durchbruch in der Entwicklung der relativistischen Kosmologie wurde erst von A. A. Friedman erzielt. Doch schon die Arbeit de Sitters hatte zu einer Krisis der relativistischen Kosmologie und zur Suche nach einer neuen Konzeption geführt. Die Krisis wurde durch Übergang zu einem nichtstatischen Modell beendet. A. A. Friedman zeigte, daß die Gleichungen des Gravitationsfeldes für ein Weltall mit einer von Null verschiedenen Dichte auch ohne kosmologisches Glied eine Lösung liefern, wenn der Weltallradius wächst.[45]

Einstein war anfangs mit Friedmans Schlußfolgerungen nicht einverstanden, aber später schloß er sich ihnen an und gab das statische Weltallmodell auf.[46] In den zwanziger Jahren erhielt Friedmans Modell eine äußerst frappierende empirische Bestätigung. Schon 1914 hatte Sliter Verschiebungen in Spektren außergalaktischer Nebel beobachtet, und zwar nach dem roten Ende hin häufiger als nach dem violetten. In den zwanziger Jahren stellte Hubble für eine große Zahl entfernter Galaxien fest, daß ihr Licht immer eine Verschiebung seiner Spektrallinien nach dem roten Ende des Spektrums hin zeigt. Die Größe der Rotverschiebung hängt von der Entfernung des Nebels ab. Sie ist um so größer, je ferner er

[45] A. Friedman, Über die Krümmung des Raumes, in: Zeitschrift für Physik, Bd. 10 (1922), S. 377–386.

[46] A. Einstein, Bemerkungen zu der Arbeit von A. Friedman, „Über die Krümmung des Raumes", in: Zeitschrift für Physik, Bd. 11 (1922), S. 326; ebenda, Bd. 16, S. 228.

uns ist. Offensichtlich weist eine solche fundamentale und allgemeine Eigenschaft der Spektren eine fundamentale und allgemeine Gesetzmäßigkeit des Weltzustandes nach. Diese Spektrallinienverschiebung kann man als Dopplereffekt deuten. Dann würde die Rotverschiebung bedeuten, daß die außergalaktischen Nebel sich von uns um so schneller entfernen, je ferner sie von uns sind. Das Universum „läuft auseinander".

Hubble leitete für die Fluchtgeschwindigkeit der außergalaktischen Nebel die Formel $v = Hr$ ab, wobei r der Abstand vom Beobachter und H die sogenannte Hubble-Konstante ($3 \cdot 10^{-18}\,s^{-1}$) ist. Die später gewonnenen quantitativen Beziehungen erlaubten, die Raumkrümmung in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit und Stoffdichte zu bestimmen. Auf diese Weise hängt von der Genauigkeit spektroskopischer Beobachtungen die Antwort auf die Frage nach der Grundeigenschaft der Welt als Ganzes ab.

Die wichtigsten Resultate der Beobachtungen Hubbles wurden Ende der zwanziger Jahre veröffentlicht. Sie sind seitdem mehrfach durch neue Beobachtungen geprüft worden. Man kann es offensichtlich als feststehend betrachten, daß das genannte lokale galaktische System, zu dem auch unsere Milchstraße gehört, sich nicht ausdehnt. Aber was dehnt sich denn eigentlich aus?

Es gibt Gründe, der Metagalaktik eine Ausdehnung zuzuschreiben: Nicht die Sternsysteme innerhalb der einzelnen Galaxis, nicht die Milchstraßen, die zu einem Haufen gehören, entfernen sich voneinander, sondern die aus Galaxienhaufen bestehenden Metagalaxien laufen auseinander. Vielleicht werden weitere Beobachtungen noch weitere Antworten darauf geben, was auseinanderläuft, wobei jede Antwort eine große Zahl unterschiedlicher Hypothesen ermöglicht. Nicht nur das Modell eines nichtstationären homogenen, expandierenden Universums mit endlicher Stoffdichte kann mit den Gleichungen des Gravitationsfeldes verträglich sein, sondern auch das eines sich zusammenziehenden Weltalls. Ist der Wert der mittleren Stoffdichte kleiner als eine bestimmte kritische Größe, so vermag die Gravitation die Ausdehnung der Metagalaxis nicht aufzuhalten, und die Ausdehnung wird sich ständig vergrößern. Sie kann zwar langsamer werden, aber nicht in Kontraktion umschlagen. Wenn die mittlere Dichte jene kritische Größe übersteigt, so ist die Gravitation stark genug, um die Ausdehnung in Zusammenziehung, also die Rotverschiebungen in Violettverschiebungen übergehen zu lassen. Die Metagalaxis wird zu „unendlich kleinen" Ausmaßen und „unendlich hoher" Dichte zurückkehren.

Das nichtstationäre Weltallmodell erlaubte Einstein, „das kosmologische Glied" in den Gravitationsgleichungen aufzugeben. Als Friedmans Arbeit erschien, war die Idee der kosmologischen Konstanten und der übergravitationellen Abstoßung schon beträchtlich ins Schwanken geraten. Die Schlußfolgerungen de Sitters hatten gezeigt, daß die kosmologische Konstante auch in den Gleichungen für ein Weltall mit einer Stoffdichte von Null vorkommen kann. Die Konstante ist also nicht eindeutig mit dem homogenen Modell und der Forderung nach endlicher Stoffdichte verbunden. Nachdem die Überlegungen Friedmans und die Beobachtungen Hubbles das nichtstationäre Weltallmodell äußerst wahrscheinlich gemacht hatten, schrieb Einstein in einem Zusatz zur zweiten

Auflage seiner Stafford-Vorlesungen: „Würde die *Hubble*-Expansion bei Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie bereits entdeckt gewesen sein, so wäre es nie zur Einführung des kosmologischen Gliedes gekommen. Es erscheint nun a posteriori umso ungerechtfertigter, ein solches Glied in die Feldgleichungen einzuführen, als dessen Einführung seine einzige ursprüngliche Existenzberechtigung — zu einer natürlichen Lösung des kosmologischen Problems zu führen — einbüßt."[47]

Eine Zeitlang schien es, daß das kosmologische Glied in den Gleichungen notwendig wäre, um eine genügend lange Expansionszeit für das Weltall zu erhalten: Die Gravitation ohne ein zusätzliches Glied gibt ein allzu schnelles Expansionstempo. Wir sind dann gezwungen, anzuerkennen, daß seit dem Expansionsbeginn weniger Zeit verflossen ist, als sich für die Sternalter mittels anderer Methoden ergibt, zum Beispiel nach der Zeitbestimmung auf Grund des radioaktiven Zerfalls in Meteoriten. In den fünfziger Jahren wurde dieser Grund für die Einführung eines kosmologischen Gliedes in die Einsteinschen Gleichungen erschüttert. Die heutigen Distanzen zwischen den Galaxishaufen erwiesen sich als größer, als man früher gedacht hatte, das Alter des Weltalls ergab sich damit als entsprechend höher. Es stimmt nun mit den Alterswerten überein, die mittels anderer Methoden errechnet worden sind. Dabei ist „Alter des Weltalls" ein relativer Ausdruck. Er besagt keineswegs, daß vor einigen Milliarden Jahren das Weltall überhaupt nicht existierte, sondern es geht um die Dauer des gegenwärtigen nichtstationären Zustandes, der zeitlich Folgezustand eines anderen sein könnte. Über letzteren ist freilich heute schwer etwas zu sagen. Die Vorstellung eines anfangs buchstäblich punktförmigen und unendlich dichten Weltalls folgt keineswegs eindeutig aus der Expansionshypothese. Es genügt, daran zu erinnern, daß man in der Kosmologie ein Element eines homogenen kosmologischen Substrates mit ein und derselben Stoffdichte als „unendlich klein" ansehen kann. Aber solche koinzidierenden Dichtewerte erhält man nur, wenn man über große Gebiete mittelt, wo lokale Inhomogenitäten keine Rolle spielen. Als „unendlich kleines" Element der Metagalaxis kann sich ein Gebiet erweisen, das die Abstände zwischen den Galaxien um viele Male übertrifft. Auch wenn die gesamte Masse des Weltalls in diesem Gebiet konzentriert wäre, so wäre die Stoffdichte in ihm doch nur bedingt unendlich, in dem gleichen Sinne wie besagtes Gebiet als unendlich klein angesehen wird.

11. Die einheitliche Feldtheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie identifiziert Gravitationsfeld und Krümmung der Raumzeit und erlaubt so, die Bewegung unter Einfluß von Gravitationskräften als Resultat der geometrischen Eigenschaften der vierdimensionalen Welt aufzufassen. Könnte man nicht auf entsprechende Weise alle Bewegung von Körpern erklären? Könnte man *alle* Felder mit Veränderungen der Raumzeit identifizieren?

Der erste Versuch dieser Art wurde 1918 von Hermann Weyl gemacht.[48] Er führte eine Geometrie ein, die allgemeiner als die Riemannsche ist.

[47] A. Einstein, Grundzüge der Relativitätstheorie, a. a. O., S. 84.
[48] Vgl. H. Weyl, Raum—Zeit—Materie, Berlin 1918.

In letzterer ändert sich in Abhängigkeit von der Raumkrümmung die *Richtung* eines Vektors, wenn er von einem Punkt in einen anderen übertragen wird. In Weyls Geometrie ändert sich bei Verschiebung außer der Richtung zusätzlich auch die *Länge* eines Vektors. Den Koeffizienten, der ausdrückt, in welchem Maß sich die Länge des Vektors in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Raumes ändert, nennt Weyl die metrische Krümmung des Raumes. Die Krümmung, von der bisher die Rede gewesen ist, erhielt den Namen vektorielle Krümmung. Im Riemannschen Raum ist zum Beispiel die vektorielle Krümmung konstant und die metrische Krümmung Null. Im Prinzip ist ein Raum mit veränderlicher vektorieller und fehlender metrischer Krümmung möglich. Die Geometrie Weyls ist noch allgemeiner: In ihr ist auch die metrische Krümmung im allgemeinen von Null verschieden. In ihr werden die Raumeigenschaften außer durch den metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$, der durch seine Ableitungen die vektorielle Krümmung bestimmt (Riemann-Christoffel-Tensor), noch durch einen Maßstabvektor gekennzeichnet. In der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit sind zur Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften zehn Komponenten des symmetrischen Tensors und vier Komponenten des Maßstabvektors erforderlich.

Einsteins Relativitätstheorie forderte, daß sich die Naturgesetze durch Gleichungen ausdrücken lassen, die gegen Bewegungstransformationen kovariant sind. Weyls Theorie fordert von diesen Gleichungen eine zusätzliche Kovarianz, nämlich Kovarianz gegenüber Maßstabtransformationen. Es gibt besondere Eigenschaften der Welt, die unabhängig von Veränderungen des Maßstabvektors sind, sogenannte maßstabinvariante Eigenschaften. Um diese Eigenschaften in Gleichungen erfassen zu können, muß man die vier zusätzlichen Komponenten des Maßstabvektors einführen.

Weyl nahm an, daß diese vier zusätzlichen Komponenten elektromagnetische Potentiale beschreiben, so wie $g_{\mu\nu}$ als Gravitationspotentiale interpretiert werden. Dann ergibt sich ein Weltbild in Form einer Veränderung der vektoriellen Krümmung (Gravitation) und der metrischen Krümmung, die elektromagnetische Felder darstellt, von Punkt zu Punkt. Die vektorielle Krümmung vergrößert sich beispielsweise in der Nähe der Sonne, die metrische Krümmung wächst hingegen in einem Scheinwerferstrahl oder neben einem mächtigen Generator. Sie äußert sich in einer Änderung der Länge des Vektors bei Parallelverschiebung auf einer in sich geschlossenen Kurve.[49]

Um die Schwierigkeiten der Geometrisierung des ektromagnetischen Feldes klarer herausarbeiten zu können, muß man einige Feststellungen wiederholen, die sich auf die Geometrisierung des Gravitationsfeldes beziehen.

Wir betrachten die Bewegungsgesetze eines materiellen Teilchens. Wenn man sie vollständig definieren kann, ohne sich auf Konstanten zu beziehen, die das Teilchen selbst charakterisieren, und sich nur auf die geometrisch aufzufassenden Eigenschaften des Mediums stützt, dann nehmen die Bewegungsgesetze des Teilchens die Form geometrischer Gesetzmäßigkeiten an. Auf eine solche Möglichkeit der Geometrisierung weist die Grundeigenschaft des Gravitationsfeldes

[49] Vgl. A. A. Фридман, Мир как пространство и время, a. a. O., S. 96.

hin, von dem im Abschnitt über das Äquivalenzprinzip ausführlich die Rede war.

Die Grundeigenschaft des Gravitationsfeldes — die Unabhängigkeit der Beschleunigung eines materiellen Teilchens von der Masse — drückt sich in der Bewegungsgleichung für das Teilchen im Schwerefeld aus. In diese Gleichung geht das Potential des Gravitationsfeldes ein, das dieses Feld charakterisiert und eine Funktion der Raum- und Zeitkoordinaten ist. Aber in der Gleichung ist weder die Masse noch eine sonstige das Teilchen charakterisierende Konstante enthalten.

Gerade darum konnte die Gravitation als eine *geometrische* Eigenschaft der Raumzeit aufgefaßt werden. Die Bewegung des Teilchens im Schwerefeld hängt nicht von der Masse des Teilchens ab. Hier unterscheiden sich Schwerefeld und elektromagnetisches Feld. Um von der Gravitation eine geometrische Vorstellung zu geben, genügt es, den Begriff der Raumzeit-Krümmung einzuführen und zu einer Riemannschen Geometrie überzugehen. Die Geometrisierung des elektromagnetischen Feldes ist ungleich schwieriger, vielleicht sogar unmöglich. Sie verlangt jedenfalls eine radikale Verallgemeinerung der Geometrie. Im elektromagnetischen Feld bewegt sich ein geladenes Teilchen entsprechend seiner eigenen Ladung. Diese geht mit in seine Bewegungsgleichung ein. Die Größe der Gravitationsladung (die schwere Masse) hingegen ändert die Fallgeschwindigkeit eines Körpers nicht, weil die schwere Masse durch die ihr gleiche träge Masse kompensiert wird. Die eine steht im Zähler, die andere im Nenner der Formel für die Beschleunigung durch Gravitation; sie kürzen sich also aus ihr heraus. Die kräftefreie und die unter Gravitation erfolgende Bewegung unterscheiden sich voneinander nur in einem festgelegten Bezugssystem.

In der Newtonschen Mechanik ist der Unterschied zwischen einer Inertialbewegung und der Bewegung unter Gravitationseinwirkung absolut, weil angenommen wird, daß die Raumzeit euklidisch ist. Die Unterteilung in diese zwei Arten der Bewegung kann man als den Unterschied zwischen geraden und gekrümmten Weltlinien auffassen. Das Trägheitsprinzip, Newtons erstes Gesetz, kann man so darlegen: Es gibt gerade Weltlinien in einer euklidischen Welt, und diese stellen die Bewegungen von Körpern dar, auf die keine Kräfte einwirken. Alle sonstigen Bewegungen erfolgen unter Einwirkung von Kräften.

Die allgemeine Relativitätstheorie eliminiert aus dieser Definition der Inertialbewegungen nur die Forderung „in einer euklidischen Welt“ und ersetzt sie durch die allgemeinere Riemannsche Welt. In dieser verwandeln sich Geraden in geodätische Linien, und die Inertialbewegungen verschmelzen mit den Bewegungen unter Einwirkung von Gravitationskräften. Die Definition lautet dann: Es gibt geodätische Linien in einer Riemannschen Welt, auf denen sich alle Körper bewegen.

Weyl streicht noch die Forderung „in einer Riemannschen Welt“ und vereinigt mit den Inertial- und Gravitationsbewegungen auch die Bewegungen unter dem Einfluß eines elektromagnetischen Feldes. Die Geometrie wird noch allgemeiner. In Weyls Theorie werden alle zu seiner Zeit bekannten Kraftfelder mit der Trägheit vereinigt: Ein sich selbst überlassener Körper, ein Körper im Schwerefeld, ein Körper im elektromagnetischen Feld — sie alle bewegen sich „gemäß ihrer Trägheit“.

In dem der Gravitation gewidmeten Abschnitt war von vier Formeln die Rede, die den vier Erhaltungsgesetzen (den drei Impulskomponenten und der Energie) entsprechen. Die Gesetze drücken die Kovarianz der Gleichung des Schwerefeldes bei Verschiebungen in Raum und Zeit aus. In Weyls Theorie kommt zu diesen vier geometrisch ausgedrückten Gesetzmäßigkeiten noch eine fünfte. Es gibt in Weyls Theorie nicht nur die vier Übergänge „nach vorn — nach hinten", „nach rechts — nach links", „nach oben — nach unten" und „früher — später", sondern noch einen fünften Übergang „mehr — weniger" für die Maßeinheiten. Dieser Übergang beeinflußt ein invariantes Objekt ebenfalls nicht. Die „Nichtbeeinflussung" äußert sich hier nicht mehr in vier, sondern in fünf Identitäten, denen fünf Erhaltungsgesetze entsprechen: die vier schon genannten und das der Erhaltung der elektrischen Ladung.

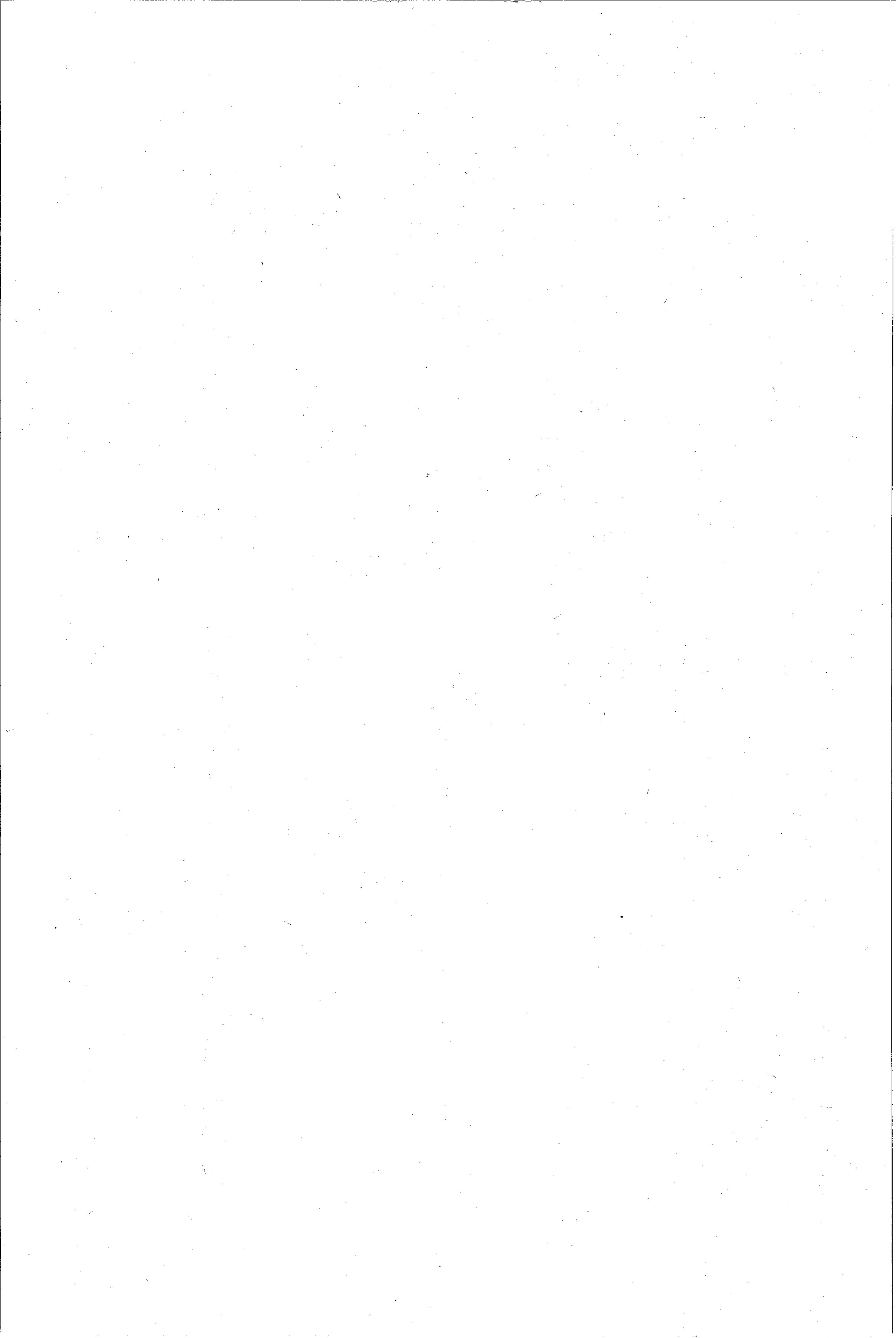
Die Wirkung bleibt in Weyls Theorie eine vierdimensionale physikalische Grundinvariante. Doch ihr entspricht nicht die Krümmung der vierdimensionalen Welt, sondern ein komplizierterer Ausdruck, der Invarianz gegen Maßstabtransformationen besitzt. Dieser Ausdruck verändert seinen numerischen Wert beim Übergang von gegebenen Einheiten zu anderen nicht, genau wie sich in Einsteins Theorie die Weltkrümmung bei Transformation der Koordinaten nicht ändert.

Es sei noch auf eine interessante Interpretation des Begriffes Wirkung hingewiesen. Sie stammt von Eddington.[50] Wenn die Wirkung durch eine invariante Zahl gemessen wird, dann kann diese Zahl nicht durch Länge, Fläche oder Volumen ausgedrückt werden. Absolut unabhängig von der Maßeinheit ist beispielsweise die Zahl der Personen in einem Zimmer, nicht aber dessen Flächeninhalt. Aber die Wirkung ist keine Anzahl irgendwelcher Individuen (etwa Elementarteilchen), denn sie kann auch durch eine gebrochene Zahl ausgedrückt werden. Es gibt jedoch ein weiteres Beispiel einer von der Maßeinheit unabhängigen Zahl, die einen Bruch darstellen kann. Das ist die Wahrscheinlichkeit oder die Wahrscheinlichkeitsfunktion. Wahrscheinlichkeiten kombinieren sich multiplikativ, Wirkungen dagegen additiv. Das legt die Vorstellung nahe, die Wirkung sei der Logarithmus der Wahrscheinlichkeit. Weil aber der Logarithmus einer Wahrscheinlichkeit eine negative Zahl ist, trägt auch die Wirkung ein negatives Vorzeichen. So wird das Prinzip der kleinsten Wirkung zum Prinzip der größten (das heißt am wenigsten negativen) Wahrscheinlichkeit.

Dieser Gedanke Eddingtons konnte sich nur im Zusammenhang mit der Entwicklung der Quantenmechanik weiterentwickeln. Weyls Theorie hat den Anstoß zu weiteren Versuchen zum Aufbau einer einheitlichen Feldtheorie gegeben. Doch sie fand keinerlei experimentelle Bestätigung. Darum ist man wieder von ihr abgekommen. Das gleiche Schicksal erlitten auch andere einheitliche Feldtheorien.[51]

Mehr als dreißig Jahre hat Einstein diesem Problem gewidmet. Doch auch er erhielt keinerlei Resultate, die eine experimentelle Prüfung, wenn auch nur in grundsätzlicher Form, zuließen.

[50] A. Eddington, Raum, Zeit und Schwere, a. a. O., S. 181.
[51] Vgl. P. G. Bergmann, Introduction to the theory of relativity, New York 1942, Teil III; A. S. Eddington, Relativitätstheorie in mathematischer Behandlung, Berlin 1925, Kap. 7.



IX. QUANTEN

1. Der diskrete Charakter des elektromagnetischen Feldes

Auf der Sitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 14. Dezember 1900 trug Planck eine von ihm entwickelte neue Theorie der Lichtemission vor, die Theorie, die der Entwicklung der modernen Mikrophysik zugrunde liegt. Die neue Physik geht von der Idee der Diskretheit der Lichtemission und -absorption und von der Existenz kleinster Energiemengen aus. Diese kleinsten Energiemengen, die Energiequanten, sind proportional der Strahlungsfrequenz. Der Proportionalitätsfaktor, das Wirkungsquantum, hat die Dimension des Produktes von Energie und Zeit. Er ist eine neue Weltkonstante. Sein Wert ist $6{,}63 \cdot 10^{-27}$ erg s.

Die Entdeckung des Wirkungsquantums ergab sich aus der Theorie der sogenannten Wärmestrahlung. Dem Wesen der Sache nach ging es freilich nicht nur um Wärmestrahlen (infrarotes Licht), sondern auch um elektromagnetische Wellen jeglicher Wellenlänge. Nur die ersten Anstöße zu jener Theorie waren von Experimenten mit Wärmestrahlen gekommen.

Wir erinnern uns zunächst an einige Begriffe, die in der Theorie der Strahlung vorkommen. Stellen wir uns hierzu einen Hohlraum vor, dessen Wände Wärme- und sonstige Strahlungen aussenden und absorbieren. Die Erfahrung zeigt, daß sich in einem solchen Hohlraum früher oder später ein Gleichgewicht von Emission und Absorption der Energie durch die Wände einstellt. Dann ergibt sich bei konstanter Temperatur eine bestimmte und feststehende Dichteverteilung der Strahlungsenergie auf die Frequenzen. Für eine bestimmte Frequenz, genauer gesagt, für ein beliebig kleines Frequenzintervall kann man die Energiedichte als eine Funktion der Frequenz annehmen. Sie heißt spektrale Dichte der Strahlung und wird mit ϱ_ν bezeichnet. Die Grundaufgabe der Strahlungstheorie ist es, die Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte von der Frequenz aufzufinden. Die grundlegende Entwicklungslinie dieser Theorie bestand Ende des 19. Jahrhunderts in der theoretischen und experimentellen Suche nach einer Kurve, die die spektrale Energiedichteverteilung für die einzelnen Abschnitte des Spektrums angab.

Gustav Kirchhoff hatte bewiesen, daß die spektrale Energiedichte bei konstanter Temperatur nicht von der Natur der Körper abhängt, die in einem Hohlraum mit ideal reflektierenden Wänden strahlen. Er fand eine Beziehung zwischen Emissions- und Absorptionsfähigkeit und der spektralen Dichte. Kirchhoff führte den Begriff des absolut schwarzen Körpers ein. Darunter ist ein die gesamte auf ihn fallende Strahlung absorbierender Körper zu verstehen. Die Gesetz-

mäßigkeiten der Strahlung eines solchen absolut schwarzen Körpers galt es zu finden.

Im Jahre 1893 gelang W. Wien in diesem Gebiet ein bedeutender Schritt vorwärts. Aus thermodynamischen und elektrodynamischen Überlegungen leitete er ein Gesetz ab, demzufolge der Ausdruck für $\varrho_\nu d_\nu$ die dritte Potenz der Frequenz und eine Funktion der veränderlichen Größe „Frequenz durch Temperatur" enthielt. Aber die makroskopische Thermodynamik beantwortete die Frage nach der Art dieser Funktion nicht. Man mußte sich unbedingt mittels eines Modells die mikroskopischen Erscheinungen vorzustellen versuchen, aus denen sich die Strahlung der Makrokörper zusammensetzte. Mit Hilfe derartiger Modelle wurde eine Energieverteilungskurve gefunden, die den experimentellen Daten für gewisse Spektralbereiche entsprach.

Die Formel, um die es sich hier handelt, wurde erstmalig von Rayleigh und danach strenger begründet von Jeans gewonnen. Für große Wellenlängen gibt diese Rayleigh—Jeanssche Formel gute Übereinstimmung mit der Beobachtung. Aber beim Übergang zu kürzeren Wellenlängen, also zu höheren Frequenzen, strebt die Energiedichte gegen unendlich. Die Strahlung wächst unbeschränkt, und es kommt zu keinem Gleichgewicht zwischen Strahlungsemission und -absorption. Doch die Erfahrung zeigt, daß sich ein solches Gleichgewicht in allen Fällen einstellt. Genaue Experimente mit absolut schwarzen Strahlern zeigten, daß mit Erhöhung der Frequenz die Funktion *nicht* nach Unendlich strebt, sondern nach Durchlaufen eines Maximums wieder fällt. Für kurze (ultraviolette) Wellen trifft nicht die Rayleigh—Jeanssche Formel zu, sondern eine andere, die W. Wien und unabhängig von ihm B. B. Golycin 1896 vorgeschlagen hatte. Jedoch widerspricht diese wiederum den Beobachtungen an langen Wellen.

Dieser Widerspruch wurde durch Plancks Konzeption beseitigt. Sie basierte auf der Vorstellung harmonischer Schwingungen von Elementen des strahlenden Körpers. Planck betrachtet jedes strahlende Element als einen linearen harmonischen Oszillator, das heißt als ein schwingendes System, in welchem sich eine Masse unter Einfluß einer Kraft auf einer Geraden bewegt, wobei die Kraft proportional dem Abstand von der Gleichgewichtslage ist und in Richtung auf sie hin wirkt. Die elektromagnetische Strahlung aussendenden Hohlraumwände sah Planck als eine Menge solcher linearer harmonischer Oszillatoren an. Diese emittieren und absorbieren Wellen und tauschen so mit der Strahlung innerhalb des Hohlraumes Energie aus.

Planck nahm nun an, daß die Energie, die ein Oszillator ausstrahlt, immer ein ganzzahliges Vielfaches einer gewissen kleinsten Größe ist, der kleinsten Energiemenge. Das heißt, daß der Oszillator sich nur in Zuständen befinden kann, in denen seine Energie

$$\varepsilon_0,\ 2\varepsilon_0,\quad 3\varepsilon_0\ \ldots,\quad n\varepsilon_0$$

beträgt. Zustände mit Energiewerten zwischen den gerade genannten sind unmöglich. Der emittierende oder absorbierende Oszillator geht mit einem Sprung aus einem der möglichen Zustände in einen anderen über. Darum wird jegliche

Strahlung stets so emittiert und absorbiert, daß die emittierte oder absorbierte Energie gleich einem Vielfachen der kleinsten möglichen Energiemenge ist, quantitativ bestimmt durch das Produkt von Frequenz und Planckschem Wirkungsquantum.

Plancks Strahlungsformel wurde in allen Fällen vom Experiment bestätigt, sowohl für hohe wie für niedrige Temperaturen und auch in den Fällen, wo sowohl das Rayleigh—Jeanssche wie auch das Wiensche Gesetz mit der Erfahrung divergierten.

Der folgende Schritt der Quantenphysik führte zur Vorstellung, daß nicht nur Emission und Absorption des Lichtes diskontinuierlich sind, sondern daß auch das Licht selbst, das elektromagnetische Feld, diskreten Charakter hat. Nach einer Äußerung Einsteins bedeutet freilich die Tatsache, daß Bier nur in Pint-Portionen ausgeschenkt und verkauft wird, noch nicht, daß das Bier im Faß selber aus nicht weiter teilbaren Portionen von der Größe eines Pints vorliegt. Letztere Vorstellung müßte erst bewiesen sein. Einen solchen Beweis für das elektromagnetische Feld führte Einstein in seinen Arbeiten von 1905 bis 1909. Schon die erste von ihnen, im selben 17. Band der „Annalen der Physik" wie der Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" erschienen, enthielt eine Vorstellung von Quanten des elektromagnetischen Feldes. Beim Faß mit Bier kann man über die eventuelle Existenz von weiter nicht teilbaren Volumina und der Größe aus den Abweichungen der Mengen Bier im Gefäß urteilen, in das man Bier geschüttet hat; wenn alles Bier als eine einzige Portion vorliegt, so fällt es beim Ausschenken in ein einziges Gefäß, und die übrigen bleiben leer. Wenn das Bier nicht aus diskreten Teilen besteht, erweist sich die mittlere Biermenge in allen Gefäßen als gleich. So kann man diskrete Portionen nach der Größe der Fluktuationen beurteilen.[1]

Einstein untersuchte die Fluktuation der Strahlungsdichte in einem geschlossenen Volumen. Er benutzte dabei die Analogie zur Dichte eines Gases. Ein in einem Reservoir eingeschlossenes Gas befindet sich in thermodynamischem Gleichgewicht. Das heißt, die Dichte des Gases ist in allen Punkten des Reservoirs die gleiche, so daß wir in zwei gleichgroßen Volumenelementen auch gleich viel Gas finden. Aber verkleinern wir die Volumina immer mehr, so stellen wir zufällige Schwankungen der Molekülzahlen in diesen fest. Bei der chaotischen Bewegung der Moleküle trifft man in einem sehr kleinen Volumen zuweilen ein, zuweilen zwei und ein anderesmal wieder überhaupt keine Moleküle an.

Solche zufälligen Schwankungen, Fluktuationen genannt, hängen mit der Diskontinuität des Stoffes zusammen. Wäre das Gas kontinuierlich, bestünde es aus unendlich kleinen Teilchen, so wäre seine Dichte nie verändert, wie klein wir auch das Probevolumen nehmen würden. Einstein rechnete die Wahrscheinlichkeit für die Anwesenheit von Molekülen in einem bestimmten Gasvolumen innerhalb des Reservoirs aus. Daß sich das Molekül überhaupt irgendwo im Reservoir mit dem Volumen V befindet, das ist sicher (Wahrscheinlichkeit 1). Die Wahr-

[1] Vgl. Ph. Frank, Einstein — sein Leben und seine Zeit, München/Leipzig/Freiburg i. Br. 1949, S. 122—123.

scheinlichkeit, es in einem kleineren Volumen v zu finden, ist $w_1 = v/V$. Die Wahrscheinlichkeit, w_n in v gleichzeitig n einzelne Moleküle zu finden, ist

$$w_n = (v/V)^n.$$

In Analogie hierzu betrachtete Einstein die Wahrscheinlichkeit, die gesamte Energie der Strahlung, die sich in einem Reservoir mit ideal reflektierenden Wänden und vom Volumen V befindet, in einem Teil v des Volumens zu finden. Die gesamte Strahlungsenergie mit der Frequenz ν ist gleich der Ableitung der spektralen Dichte im Frequenzintervall nach dem Intervall, multipliziert mit dem Volumen des Reservoirs, in dem sich die Strahlung befindet: $E = V\varrho_\nu\, d\nu$.

Die Wahrscheinlichkeit der Lokalisation der gesamten Energie in v ist

$$w = (v/V)^{E/h\nu},$$

wobei h die Plancksche Konstante bedeutet. Die Analogie zur Wahrscheinlichkeit, n Moleküle eines Gases in v zu treffen, wird vollkommen, wenn man sich die Strahlung als aus n Teilchen bestehend vorstellt, deren jedes die Energie $h\nu$ besitzt. Dann entspricht die Zahl der Moleküle n der Zahl der Strahlungsteilchen, die in den Exponenten der Formel eingehen, also $n = E/h\nu$.

Nun betrachten wir die Fluktuationen, die plötzlichen Abweichungen der Strahlungsenergie E in kleinen Raumbereichen von ihrem Mittelwert $\bar{E}$.

$$\varepsilon = E - \bar{E}.$$

Im zeitlichen Mittel verschwindet ε, weil es sowohl positive wie auch negative Werte annimmt. Der Mittelwert des Quadrates von ε ist schon nicht mehr Null, weil das Quadrat ja stets positiv ist. Er ist gleich

$$\overline{\varepsilon^2} = h\nu\bar{E}.$$

Doch solch eine Fluktuation kann, wie Einstein zeigte, nur in einer diskontinuierlichen Strahlung stattfinden. Wenn man sich ein kontinuierliches, das Volumen V ausfüllendes Medium vorstellt, erhält man eine andere Fluktuationsformel. In diesem Falle sind die Fluktuationen nicht mehr zufällige Schwankungen der Anzahl der Teilchen im Volumen, sondern eine Interferenz von Wellen, die sich allseitig ausbreiten. Die Interferenzmaxima und -minima sind unbeständig. Letzterem Bilde entspricht ein bestimmter mathematischer Ausdruck, der die mittlere quadratische Energiefluktuation beschreibt.

Einstein leitete den ersten Ausdruck für die Fluktuation ab, indem er von der Wienschen Strahlungsformel ausging, die für verhältnismäßig hohe Frequenzen experimentell bestätigt ist. Sie entsprach dem Bild einer diskreten Strahlung. Der zweite Ausdruck für eine Fluktuation, der einer kontinuierlichen Strahlung entsprach, wurde von Einstein aus der Formel von Rayleigh-Jeans abgeleitet, die für relativ niedrige Frequenzen gültig ist. Das hieß also, daß bei kurzen Wellen der diskrete Charakter der Wellen wesentlich war, bei langen aber der kontinuierliche.

Aber wenn man der Berechnung Plancks Formel zugrunde legt, die für *alle* Wellenbereiche richtig ist, dann besteht der Ausdruck für die Fluktuation aus zwei Gliedern, von denen das eine die Fluktuation diskreter Strahlungsteilchen beschreibt, das zweite aber zufällige Wellenfluktuationen in einem kontinuierlichen Medium.

In dieser Theorie geht es dem Wesen nach nicht nur um die Diskontinuität der Strahlung, sondern auch um die Existenz diskreter Lichtteilchen. Mit diesen Lichtquanten oder Photonen erklärte Einstein die Gesetzmäßigkeiten des photoelektrischen Effektes. Das ist eine Erscheinung, bei der das Licht Elektronen aus einer Metalloberfläche herausschlägt und Lichtenergie in die kinetische Energie der Elektronen übergeht.

Mit der Wellentheorie konnte man diesen Effekt wie folgt erklären: Das Licht ruft erzwungene Schwingungen des Elektrons hervor, und bei Resonanz zwischen der Eigenschwingungsperiode des Elektrons und der Periode der Lichtwelle kann das Elektron schließlich die Oberfläche des Metalls verlassen. Von diesem Standpunkt aus ist die Energie des das Metall verlassenden Elektrons proportional der Lichtintensität. Aber in Wirklichkeit ist die Energie der Elektronen, die das Licht aus der Metalloberfläche herausschlägt, keineswegs von der Lichtintensität abhängig. Von ihr hängt nur die Anzahl der freigesetzten Elektronen ab. Die Geschwindigkeit der Elektronen und ihre Energie zeigten jedoch eine lineare Abhängigkeit von der Lichtfrequenz.

Einstein zeigte, daß diese Proportionalität erklärt werden kann, wenn man die klassische Wellentheorie des Lichtes aufgibt und statt dessen annimmt, daß Licht ein Strom von einzelnen Teilchen (Photonen) ist. Jedes Photon, das vom Metall absorbiert wird, gibt seine Energie an ein Elektron ab. Ist die Energie groß genug, so überwindet das Elektron seine Bindung und verläßt die Metalloberfläche. Daher hängt die Elektronenenergie von der Photonenenergie $h\nu$ ab und ist von der Lichtfrequenz linear abhängig. Die Zahl der Photoelektronen ist proportional, jedoch nicht gleich der Zahl absorbierter Photonen, denn nicht jedes Photon setzt ein Elektron der Metalloberfläche frei.

So drang die Idee der Diskontinuität in die Elektrodynamik beziehungsweise in die Optik ein. Es ging dabei auch um die Quantisierung der Lichtenergie im Raum. Es schien, als wiche die Kontinuumsphysik unter dem Ansturm der atomistischen Ideen zurück. Tatsächlich aber strebte die Wissenschaftsentwicklung zu einer Synthese von atomistischen und Kontinuumsvorstellungen hin, zu neuen Ansichten über Teilchen und Wellen, für die es in der klassischen Physik keine vollständigen Analogien gab. Im Keim enthielt schon Einsteins Lichtquantentheorie das „Welle-Teilchen-Dilemma", das für die Physik des 20. Jahrhunderts so charakteristisch ist. Zwar erklärte die korpuskulare Auffassung des Lichtes den Photoeffekt, doch andere optische Erscheinungen behielten ihre Erklärung durch Licht*wellen*.

So beantwortet die Physik die Frage, was Licht ist, summarisch etwa so: „Nicht Wellen und nicht Korpuskeln, sondern Wellen *und* Korpuskeln", wobei diese Wörter schon nicht mehr völlig denselben Sinn wie in der Frage haben.

Unser Jahrhundert begann in der Physik eigentlich um 1895. Die Entdeckung des Elektrons legte den Grund zu einer neuen Periode. Erstens, weil die sich aus ihr entwickelnde Elektronentheorie zur relativistischen Mechanik führte. Das Elektron war zweitens das erste den Menschen bekannt gewordene *Elementarteilchen*. Elementarteilchen zeichnen sich gerade durch die Untrennbarkeit von Wellen- und Korpuskeleigenschaften aus. Das Elementarteilchen, das als nächstes bekannt wurde, das Photon, hat korpuskulare Eigenschaften hinsichtlich des Photoeffektes, und Welleneigenschaften bei Beugungs- und Interferenzerscheinungen. Beim Elektron waren zunächst nur seine korpuskularen Eigenschaften bekannt, seine Welleneigenschaften wurden erst Mitte der zwanziger Jahre entdeckt. Allerdings hatte Niels Bohr schon 1913 gewisse vom Standpunkt der klassischen Physik aus paradoxe Besonderheiten des Verhaltens von Elektronen in Atomen beschrieben.

2. Das Atommodell

Die spezielle Relativitätstheorie schloß optische Konstanten und Begriffe in die Mechanik der Makrowelt ein. Die Theorie Bohrs führte sie auch in die Mechanik des Atoms ein.

Vor allem suchte man in der atomaren Mechanik nach einem Gesetz für die Elektronenbewegung um den positiv geladenen Kern. Man ging von der Vorstellung einer positiven Zentralladung und sie umkreisender Elektronen aus. Die Anziehung, die notwendigerweise zwischen positivem Kern und Elektron entsteht, konnte nämlich nur durch die Fliehkraft des Elektrons ausbalanciert werden, das den Kern umkreist, ähnlich wie ein Planet die Sonne. So sah das von Rutherford geschaffene Modell vom Bau des Atoms aus. Aber in der klassischen Strahlungstheorie ergaben sich aus der Bewegung des Elektrons im Atom elektromagnetische Schwingungen. Diese mußten unvermeidlich, weil die Elektronen Ladung tragen, elektromagnetische Wellen derselben Frequenz hervorrufen. Darum konnte man sich die Strahlung eines Atoms als Ergebnis der Umläufe des Elektrons auf Bahnen um den Kern vorstellen. Diese Vorstellung harmonierte zwar mit der klassischen Elektrodynamik von Maxwell und Lorentz, konnte jedoch nicht mit den spektroskopischen Beobachtungen vereinbart werden. So bereiteten die experimentellen Arbeiten und die Diskussion ihrer Resultate den Verzicht auf die Prämissen der klassischen Elektrodynamik innerhalb des strahlenden Atoms vor und zugleich auch eine grundlegende Veränderung der Prinzipe der Mechanik des Atoms und der Vorstellungen von der Bewegung des Elektrons. Die Weiterentwicklung der ursprünglichen Atomvorstellungen, das Studium der Spektren und die Quantenvorstellung waren die Grundlagen für Bohrs Theorie.

Bohr führte den Quantenbegriff in das Bild vom Atom ein und erklärte so die empirisch gefundenen spektroskopischen Daten. Er wandte die Idee der Quantelung auf das mechanische System des Atoms an, das aus Kern und planetenartigen Elektronen besteht. Die Postulate der Theorie Bohrs erklären vor allem die Stabilität der Atome. Die klassische Mechanik und Elektrodynamik konnten

dies nicht. Denn die Elektronen bewegen sich auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen, also beschleunigt. Eine solche Bewegung führt aber nach Maxwell und Lorentz zur Ausstrahlung elektrischer Wellen. Dadurch verliert das Elektron Energie; seine Umläufe nähern sich immer mehr dem Kern, und schließlich stürzt es in ihn hinein. Die klassische Theorie konnte auch den diskreten Charakter der Spektrallinien der Atome nicht erklären. Wenn die kontinuierliche Strahlung die Energie des Elektrons vermindern und seine Umlaufbahn schrumpfen lassen würde, so würde sich die Frequenz entsprechend ändern. Dann würden Atome, die durch Ausstrahlung unterschiedlich viel Energie verloren haben, Spektrallinien aller möglichen Frequenzen aussenden und ein kontinuierliches Spektrum liefern, nicht aber scharfe diskrete Linien.

Bohr formulierte seinen Gedanken der Existenz diskreter stationärer Energiewerte in zwei Postulaten:

1. Es existieren stationäre Zustände des Atoms, deren Energien nur diskrete Werte $E_1, E_2, E_3 \ldots$ annehmen können, wobei der Übergang von einem Zustand in einen anderen durch einen Sprung erfolgt;
2. hierbei wird Strahlung bestimmter Frequenz ausgestrahlt. Diese Frequenz hängt nicht mit der Frequenz der periodischen Elektronenbewegung zusammen, sondern mit der Energiedifferenz $E_m - E_n$ zwischen Ausgangs- und Endzustand: $h\nu = E_m - E_n$.

Diese Beziehung heißt Bohrsche *Frequenzbedingung*.

Bohrs Theorie errang große Erfolge; sie erlaubte, die Ergebnisse der spektroskopischen Beobachtungen in einem strengen System zu vereinigen. Aber sie versagte bereits beim Versuch, vom wasserstoffähnlichen Atom zum neutralen Heliumatom überzugehen, das heißt zu einem System mit zwei Elektronen, die sich um einen Kern bewegen. Hier zeigte sich der Kompromißcharakter der Bohrschen Theorie.

Diese Geschichte ist besonders für die heutige Quantenelektrodynamik lehrreich, die wesentliche Erfolge dadurch erreicht hat, daß sie neue experimentelle Daten mit Annahmen erklärte, die vorerst nicht aus allgemeinen Prinzipien ableitbar sind. Wahrscheinlich werden die erwähnten Schwierigkeiten die heutige Quantentheorie zu noch radikaleren nichtklassischen Vorstellungen führen, als das beim Übergang der Theorie Bohrs zur Quantenmechanik in der Zeit zwischen 1913 und 1925 der Fall war.

Bevor wir auf die Quantenmechanik eingehen, muß noch auf eine wichtige Seite der Theorie Bohrs hingewiesen werden, auf das sogenannte *Korrespondenzprinzip*.

Dieses Prinzip wurde von Bohr im Zusammenhang mit dem Problem postuliert, die Bewegung von Elektronen auf kernfernen Bahnen zu beschreiben. Es geht also um Atomzustände, die durch große Quantenzahlen charakterisiert sind. Je größer die Quantenzahl n ist, um so benachbarter sind die stationären Zustände und um so näher kommt die Quantenbedingung für die Frequenzen der klassischen Vorstellung, daß die Strahlungsfrequenz von der Umlauffrequenz des Elektrons im Atom abhängt. Nach der klassischen Elektrodynamik ist die Frequenz des ausgestrahlten Lichtes ein Vielfaches der Elektronenumlauffrequenz. Bezeichnet

man die Umlauffrequenz mit ω, so kann man sich das Spektrum der emittierten Strahlung gemäß der klassischen Formel

$$\nu = n\omega$$

vorstellen, wobei n eine ganze Zahl ist. In Bohrs Theorie hingegen wird ν durch die beiden stationären Zustände m und n bestimmt. Sind m und n groß im Vergleich zu $n - m$ (m ist auch ganzzahlig), so wird die Strahlung, die beim Übergang vom Zustand n in den Zustand m ausgesandt wird, annähernd

$$\nu \approx (n - m)\omega$$

sein, also ein Vielfaches von ω. Folglich nähert sich bei großen Quantenzahlen die Quantenbedingung der Frequenzen den klassischen Verhältnissen an, die für Ausstrahlungsfrequenz und Umlauffrequenz bestehen. Dieses Resultat verallgemeinernd, betrachtet Bohr die klassischen Gesetze als Grenzfall der Quantengesetzmäßigkeiten.

3. Die de-Broglie-Wellen

Im Sommer 1923 entschloß sich Louis de Broglie, der sich auf die Verteidigung seiner der Begründung der Quantenbedingungen Bohrs gewidmeten Dissertation vorbereitete, seine Ausgangsideen in einem kurzen Artikel zu veröffentlichen. Dieser Artikel erschien in den Berichten der Pariser Akademie der Wissenschaften im Frühherbst. In ihm war in noch wenig ausgefeilter Form eine neue Vorstellung vom Zusammenhang zwischen Wellenprozessen in einem nichtkontinuierlichen Medium und der Bewegung einzelner Teilchen ausgesprochen. Im November verteidigte de Broglie dann seine Dissertation. Sie wurde 1924 veröffentlicht[2] und legte den Grund zu einer neuen Periode der Entwicklung der Quantenphysik.

Nach de Broglie hat ein Teilchen Welleneigenschaften dergestalt, daß seiner Bewegung mit der Geschwindigkeit v die Ausbreitung einer Welle mit der Geschwindigkeit

$$u = c^2/v$$

entspricht. Bekanntlich ist die Geschwindigkeit eines Körpers immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Darum ist u immer größer als die Lichtgeschwindigkeit, was dem Relativitätsprinzip nicht widerspricht, denn dieses grenzt die Geschwindigkeit nur für den Transport von Energie und Masse — die allein Signale übertragen können — ein. Über die Größenordnung der Geschwindigkeit der de-Broglie-Wellen (auch Materiewellen genannt) kann man sich an Hand von einfachen Beispielen eine Vorstellung machen. Wenn ein Fußgänger drei bis fünf km/h

[2] Vgl. L. de Broglie, in: Ann. de Physique, vol. 10 (1925) p. 22.

zurücklegt, dann haben seine Materiewellen die kolossale Geschwindigkeit von etwa $4 \cdot 10^{17}$ m/s erreicht. Der Geschwindigkeit der Materiewellen eines Zuges mit zehnfacher Fußgängergeschwindigkeit entspricht eine relativ langsame Ausbreitung der de-Broglie-Wellen, doch sind sie immer noch Billionen mal schneller als er selbst. Wie können diese gigantisch schnellen Wellengeschwindigkeiten mit den ungleich kleineren mechanischen Geschwindigkeiten verknüpft sein? Louis de Broglie erklärte dies mit Hilfe des Begriffes der Gruppengeschwindigkeit von Wellen.

Wenn in ein und demselben Medium gleichzeitig Schwingungen verschiedener Frequenzen auftreten, also durch jeden Punkt des Mediums Wellen verschiedener Länge gehen, so kann die Amplitude der resultierenden Schwingungen in bestimmten Punkten sehr groß sein. Dort, wo die Schwingungen in ihren Phasen genau oder fast zusammenfallen, bilden sich Zentren von Wellengruppen. Man kann beweisen, daß sich solche Zentren mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit fortbewegen. De Broglie identifizierte die Teilchengeschwindigkeit v mit der Geschwindigkeit einer solchen Wellengruppe. Das Teilchen wird in dieser Theorie als ein sogenanntes Wellenpaket angesehen, als eine Art Punkt, in dem die Interferenz der Wellen eine besonders energiereiche Schwingung hervorruft. Solch ein Wellenpaket hat ebenfalls die Geschwindigkeit v.

Um diese Theorie ausführlicher und genauer darlegen zu können, sei der Leser an einige Begriffe und Formeln erinnert, die die Ausbreitung von Wellen betreffen. Bekanntlich ist der Wellenvorgang eine einfache periodische Zeitfunktion, die durch den Ausdruck

$$S = A \sin (2\pi\nu t + \varphi_0)$$

beschrieben wird. A ist dabei die Amplitude der schwingenden Größe, etwa der Koordinate der Feldstärke oder der Wahrscheinlichkeit irgendeines Ereignisses usw., ν die Schwingungsfrequenz, φ_0 die Anfangsphase. Den Ausdruck in der Klammer nennt man die Phase der Schwingung. Als Schwingungsperiode T wird die Zeit bezeichnet, in der sich der Wert von S wiederholt. Daraus folgt: $T = 1/\nu$. Die Schwingungsphase eines Punktes, der vom Schwingungsausgangspunkt um x entfernt ist, wird durch die Formel

$$\varphi = 2\pi\nu\,(t - x/u)$$

angegeben. u ist dabei die Phasengeschwindigkeit.

Nun nehmen wir an, die Zeit werde so gewählt, daß für $t = 0$ auch $S = 0$ ist. Anderenfalls muß man zur Wellenformel noch die anfängliche Phase zufügen, so daß

$$\varphi = 2\pi\nu\,(t - x/u) + \varphi_0$$

gilt.

Der letzte von uns benötigte Begriff ist der des Wellenvektors $\mathfrak{k}$. Seine Richtung fällt mit der positiven Normalen zur Oberfläche in einer gleichen Phase zu-

sammen. Der absolute Betrag des Wellenvektors ist gleich der reziproken Wellenlänge, der Zahl der Wellen pro Längeneinheit, das heißt der Wellenzahl, von der schon die Rede war. Also:

$$|\mathfrak{k}| = 1/\lambda.$$

Bis jetzt war von normalen, sinusförmigen Schwingungen die Rede. Aber solche periodischen Schwingungen sensu strictu gibt es in der Natur nicht. Periodizität im strengen Sinne bedeutet nämlich, daß für beliebig lange Zeiten die periodische Funktion $f(t)$ in den gleichen Zeitabständen T immer denselben Wert annimmt, und das für beliebig hohe Periodenanzahl. Aber reale Schwingungen dauern nicht ewig, sie haben Anfang und Ende. Sie sind auch räumlich begrenzt. Mit dieser Erschwerung kommt die Mathematik leicht zurecht. Wo ein Wellenvorgang von der Sinusform abweicht, kann er in sinusförmige Komponenten zerlegt werden. Mit anderen Worten: Wenn sich eine periodische Funktion nicht harmonisch verändert, dann kann man sie gemäß einem Theorem von Fourier in einzelne harmonische Funktionen in Form einer sogenannten Fourierreihe zerlegen. Deren Glieder haben Frequenzen, die ein ganzzahliges Mehrfaches der Frequenzen der nicht harmonischen Schwingungen sind: ν, 2ν, 3ν ...

Bei elektromagnetischen Schwingungen mit ganzzahligen Vielfachen von ν geben diese Schwingungsglieder diskrete Spektren mit ideal dünnen Linien, denn jeder von ihnen entspricht nur eine Frequenz. Wenn einer einzelnen Linie mehrere Frequenzen entsprechen, die sich voneinander nur sehr wenig unterscheiden, fällt die Linie etwas verschmiert aus, sie nimmt einen endlichen Spektralbereich ein.

Begriffe aus der Optik kann man auch in bezug auf andere Funktionen anwenden. In allen Fällen kann man die Zerlegung einer Funktion in eine Fourierreihe als *Zerlegung in ein Spektrum* beziehungsweise als spektrale Zerlegung auffassen. Man kann aber auch eine akustische Terminologie gebrauchen und die Grundschwingung mit der kleinsten Frequenz als Grundton und die anderen als Obertöne bezeichnen. Die bei der Zerlegung auftretenden Koeffizienten, die Fourierkoeffizienten, sind als die Amplituden der Obertöne aufzufassen. Die Amplituden können positiv wie negativ sein. Die Intensität jedoch kann nur positiv sein, da sie durch das Amplitudenquadrat gemessen wird.

Alle diese Begriffe kann man verallgemeinern und auf nichtperiodische Schwingungen anwenden. Die Fourierreihe wird dabei durch ein sogenanntes Fourierintervall ersetzt, ein Intervall der Frequenzen. Nun kann man nicht mehr von einer Zerlegung in ein *diskretes* Spektrum sprechen, denn die Frequenzen ändern sich kontinuierlich, und die Funktion wird in ein *kontinuierliches* Spektrum zerlegt.

Diese Angaben über die Darstellungsmöglichkeiten von Wellenvorgängen reichen aus, um im weiteren die Arbeiten von de Broglie, Schrödinger und Heisenberg darlegen zu können.

De Broglie fand eine Erklärung für die Bohrschen Postulate, indem er auf die spezielle Relativitätstheorie zurückgriff und einen Gedanken Hamiltons, der schon über hundert Jahre alt war, weiterentwickelte und anwandte.

In der Physik der neuesten Zeit ist die Analyse alter Theorien, ihre Interpretation und Verallgemeinerung manchmal so eng mit neuen Ideen verknüpft,

daß die Tiefe historischer Exkurse, das Interesse an der Vergangenheit der Wissenschaft, die Größe des historischen Intervalls, das der Wissenschaftler analysiert, zuweilen zum Maß und Merkmal der Originalität und Weite der neuen Ideen wird.

In seiner Dissertation ging de Broglie von der Analogie zwischen zwei Verallgemeinerungen der klassischen Physik aus, dem Prinzip der Ausbreitung des Lichtes in der kürzesten Zeit und dem Prinzip des kleinsten Intervalls der mechanischen Geschwindigkeit bei Bewegung eines materiellen Punktes. Beides sind Variationsprinzipien.

Dieser Gedankengang verdient das Interesse des Wissenschaftshistorikers. De Broglie zeigte damit nicht nur den Zusammenhang zwischen der klassischen und der neuen Physik, sondern auch die besondere Rolle der Variationsprinzipien beim Übergang zu heutigen Vorstellungen sowie ihre besondere Stellung in der klassischen Physik, die eine retrospektive Betrachtung deutlich werden läßt.

In dem Abschnitt von de Broglies Dissertation, der sich mit der analytischen Mechanik und dem Prinzip der kleinsten Wirkung beschäftigt, wird gesagt, daß man die Gesetze der geometrischen Optik aus der Forderung nach kürzester Zeit für die Lichtausbreitung, also aus dem Fermatschen Prinzip, ableiten könne. In einem Medium, in dem sich die Lichtgeschwindigkeit kontinuierlich ändert, betrachtet man das Integral des reziproken Wertes der Phasengeschwindigkeit $1/u$ über den Weg der Lichtausbreitung. Dieses Integral ist bei der tatsächlichen Lichtausbreitung ein Minimum.

Beim Maupertuisschen Prinzip spielt die mechanische Geschwindigkeit v die Rolle des reziproken Wertes der Phasengeschwindigkeit im Fermatschen Prinzip. Maupertuis' Prinzip erhält man aus Fermats Prinzip, wenn man v proportional $1/u$ setzt. Dann erscheint v als ein Wellenvorgang, dessen Phasengeschwindigkeit u ist. v und u sind miteinander durch einen Proportionalitätsfaktor verbunden. Man kann die Analogie zwischen Lichtausbreitung und Teilchenbewegung noch weiter führen. Bisher ging es einerseits um einen Lichtstrahl, andererseits um die Bewegung eines Teilchens. Der Strahl ist aber eine Normale auf der Kugel gleicher Phasenwerte. Dementsprechend kann man in der Mechanik den Impulsvektor $\mathfrak{p}$ als Normale auf der *Oberfläche der gleichen Wirkung* W ansehen. Um das Prinzip der kleinsten Wirkung in Wellenform zu formulieren, stellen wir uns eine sich wellenförmig ausbreitende Wirkung vor, also eine Wirkung als Phase einer Welle, die sich vom Ausgangspunkt aus allseitig ausbreitet. Die Phase ist eine dimensionslose Größe. Darum entspricht ihr in der Mechanik der Bruch Wirkung/Konstante h (h hat bekanntlich die Dimension einer Wirkung).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der „Wellenwirkung", also die Geschwindigkeit der Oberfläche gleicher Wirkung (analog der Oberfläche gleicher Phase in der Optik) ist

$$u = E/p = E/mv,$$

wobei E die Energie des bewegten Teilchens und p der absolute Betrag des Impulses ist. Diese Geschwindigkeit ist offensichtlich umgekehrt proportional der Teilchengeschwindigkeit v.

Wir erinnern daran, daß die Phasengeschwindigkeit u der Welle durch den absoluten Betrag des Vektors $\mathfrak{k}$ und die Frequenz ν durch

$$u = \nu/k$$

ausgedrückt werden kann.

In der Mechanik entspricht dieser Geschwindigkeit die Phasengeschwindigkeit der „Wirkungswellen"

$$u = E/p.$$

Nun parallelisieren wir die *Gruppengeschwindigkeit* in der Optik mit der Geschwindigkeit eines Teilchens in der Mechanik. Beide Ausdrücke erhält man durch Differenzieren. Die Gruppengeschwindigkeit ist $\partial\nu/\partial k$ und die Teilchengeschwindigkeit als Geschwindigkeit der „Wirkungswelle" $\partial E/\partial p$.

Also kann man von der Optik zur Mechanik übergehen, indem man ν durch E und $\mathfrak{k}$ durch $\mathfrak{p}$ ersetzt. Energie und Impuls gehören zum Teilchen; Frequenz und Wellenvektor zur Welle. Sie verbindet miteinander der Koeffizient h, der die Dimension einer Wirkung hat

$$\nu = E/h; \qquad \mathfrak{k} = \mathfrak{p}/h.$$

Ihren Höhepunkt erreichte die Verallgemeinerung de Broglies mit der Annahme, daß dieser Koeffizient mit dem Planckschen Wirkungsquantum gleichzusetzen sei. Dann ist die Teilchenenergie durch die Frequenz $E = h \cdot \nu$ und der Impuls durch den Wellenvektor $\mathfrak{p} = h \cdot \mathfrak{k}$ ausdrückbar. Hieraus folgt die de-Broglie-Wellenlänge λ. Der absolute Betrag des Wellenvektors ist reziprok der Wellenlänge, also ergibt sich nach Substitution von k durch $1/\lambda$ $p = h/\lambda$ und $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu}$.

Zur Errechnung der Frequenz muß man die relativistische Formel $E = mc^2$ benutzen: $\nu = mc^2/h$.

Die Anwendung der relativistischen Masse-Energie-Beziehung ist historisch gesehen eine der wichtigsten Ideen de Broglies. Seine Theorie erwies sich im gewissen Sinne als eine Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips und der Quantentheorie. Tatsächlich verknüpfte er die zwei Grunddefinitionen der Energie miteinander: die relativistische $E = mc^2$ und die der Quantentheorie $E = h \cdot \nu$.

De Broglies Theorie erlaubte, die damals ernsteste Schwierigkeit der Quantenphysik zu überwinden, sie vermochte die Umlaufbahn eines Elektrons aus einem allgemeinen Prinzip abzuleiten und befreite damit von der Willkür der Wahl „erlaubter Bahnen". Gerade in den zwanziger Jahren war die physikalische Interpretation der Quantenbedingungen Bohrs für die Elektronenbahnen eine Hauptforderung der Physik, und das Fehlen einer solchen Interpretation wurde von den Erfolgen des Bohrschen Modells immer weniger aufgewogen.

Man kann mehrere analoge historische Situationen nennen, in denen die Schwierigkeiten einer Theorie bei der Erklärung einer immer größeren Menge von

Erscheinungen dazu zwangen, sich ihrer Grundlagen zu erinnern. Anscheinend befindet sich die Quantenelektrodynamik gegenwärtig in einer solchen Situation.

Um das Jahr 1920 stimulierte eine Reihe bedeutender Entdeckungen die Tendenzen zur Vereinigung von Optik und Mechanik: die Relativitätstheorie, die Theorie des Wirkungsquantums, die Photonentheorie, das Bohrsche Atommodell. Die Schwierigkeiten des letzteren schienen lösbar, wenn man die optischen Konstanten und Begriffe noch radikaler in die Mechanik, besonders die des Atoms, einbezog.

De Broglie betrachtete die Elektronen- und allgemeine Mechanik mit Hilfe optisch-mechanischer Analogien. Die geometrische Optik ist insoweit gültig, als wir die endliche Länge der Lichtwellen nicht berücksichtigen müssen. Streng gilt sie nur für unendlich kurze Wellen.

Könnte auch die klassische Mechanik streng nur bei unendlich kleinen Materiewellenlängen gelten? Könnten die Abweichungen von den klassischen Gesetzen, die Bohr im Atominneren festgestellt hat, dadurch erklärt werden, daß man die undulatorischen Korrekturen für die klassischen Bewegungen mit berücksichtigt?

De Broglie betrachtet periodische Bewegungen auf einer geschlossenen Umlaufbahn, also Bohrs Problem, und kommt zu dem Schluß, daß sich das Teilchen nur auf solchen Kreisbahnen mit konstanter Geschwindigkeit bewegen kann, deren Länge ein ganzzahliges Vielfaches seiner Wellenlänge ist. Daraus kann man nach de Broglie die Bohrschen Quantenbedingungen für ein wasserstoffartiges Atom ableiten.

Wenn die Quantelung die Wellennatur der Teilchenbewegung ausdrückt, dann ist vielleicht die klassische Mechanik im ganzen nur ein Grenzfall der Wellenmechanik, so wie die geometrische Optik nur für unendlich kleine de-Broglie-Wellen streng zutrifft. Die Grenze der geometrischen Optik wird durch die Interferenz und Beugung des Lichtes demonstriert. Vielleicht lassen sich für die Teilchenbewegung analoge Eigenschaften entdecken, wo die de-Broglie-Wellenlänge relevant wird?

Das Experiment beantwortete diese Frage positiv, und das war eines der wichtigsten Ereignisse in der Geschichte der Quantenmechanik. Mag auch jeder neue Schritt der theoretischen Forschung noch so viel geben, mögen auch die immer mächtigeren und eleganteren Methoden der mathematischen Bearbeitung physikalischer Probleme noch so viele neue Seiten und Beziehungen zwischen den Fakten aufdecken, so ist dennoch jede wirklich neue Periode in der Physik an neue experimentelle Beobachtungen gebunden. Mehr noch, jede neue physikalische Theorie, die das Weltbild umgestaltet, beweist ihren nichttrivialen Charakter und ihre Kraft dann, wenn sie Erscheinungen voraussieht, die man durch experimenta crucis entdecken kann. Im vorigen Kapitel erinnerten wir an die sehr tiefgreifende erkenntnistheoretische Idee Einsteins: Die Auswahl einer wissenschaftlichen Theorie, die nicht aus den direkten Resultaten der Erfahrung entspringt, ist an die bewußte oder intuitive Vision eines prinzipiell möglichen Experimentes gebunden, das den eingeführten Begriffen einen physikalischen Sinn gibt. Die Möglichkeit eines experimentum crucis ist das wichtigste Kriterium für den historischen Reifegrad einer Theorie. Die experimentelle Lösung von Auf-

gaben ist in den kontinuierlichen Weg des wissenschaftlichen Fortschrittes unabdingbar eingeschlossen. Newtons Gravitationstheorie ohne die astronomischen Entdeckungen des 18. Jahrhunderts, das periodische System der Elemente ohne die Entdeckung des Galliums, Germaniums und Scandiums, die Relativitätstheorie ohne die Resultate der Expeditionen von 1919 — sie alle hätten nichts von ihrer logischen Strenge verloren, doch ihre geschichtliche Rolle wäre eine andere gewesen. Für die Geschichte der Wellen- und Quantenmechanik haben jene Experimente aus den Jahren 1925 bis 1927 erstrangige Bedeutung, die die Beugungserscheinungen bei Elektronenbewegungen nachwiesen.

Bald nach der Publikation der Arbeit de Broglies äußerte Einstein den Gedanken, daß es unvermeidliche Beugungserscheinungen an bewegten Elektronen geben müßte. Diese Erscheinungen müßten sich bei geringen Elektronengeschwindigkeiten beobachten lassen. Die Theorie de Broglies verknüpft ja die Länge der Materiewelle mit der mechanischen Geschwindigkeit des Teilchens gemäß der Gleichung

$$\lambda = h/mv\,.$$

Bei einem genügend langsamen Elektron nimmt die Wellenlänge Werte an, die eine experimentelle Feststellung von Beugungserscheinungen erlauben. Das gilt auch für Protonen. Darum sind nach Einstein[3] bei sehr niedrigen Temperaturen, bei denen die Länge der de-Broglie-Welle von derselben Größenordnung wie der Moleküldurchmesser wird, Anomalien der Beugung zu erwarten. Solche Anomalien hatte man schon mehrfach beobachtet. Ein Jahr vor Einsteins Arbeit hatte P. Günther einen unerwartet schnellen Abfall der Viskosität von Wasserstoff unterhalb einer bestimmten Temperatur beobachtet.[4] Einstein schlug vor, derartige Abweichungen, die für niedrige Temperaturen typisch sind, durch die Beugung der de-Broglie-Wellen zu erklären. Bald darauf vermerkte Walter Elsasser[5], daß Beugungserscheinungen auch beim Zusammenstoß freier Elektronen mit Atomen zu beobachten sein müßten. Auch hierfür gab es bereits Beobachtungen, die der Erklärung harrten, vor allem die beträchtliche Vergrößerung der freien Weglänge langsamer Elektronen beim Durchgang durch Edelgase.

Spezielle Versuche wurden 1927 von Davisson und Germer[6] angestellt. Dabei richteten sie einen dünnen, gebündelten Elektronenstrahl auf einen Nickeleinkristall und bestimmten die Zahl der Elektronen, die dabei unter verschiedenen Winkeln gestreut wurden. Diese Zahl gab für gewisse Richtungen ausgeprägte

[3] A. Einstein, Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, zweite Abhandlung, in: Sitzungsber. d. Preuß. Akademie der Wissenschaften, Physik.-mathem. Klasse, Bd. 9 (1925), S. 10ff.

[4] Vgl. P. Günther, Über die innere Reibung der Gase bei tiefen Temperaturen, in: Zeitschrift für physikalische Chemie, Bd. 110 (1924), S. 626—636.

[5] Vgl. W. Elsasser, Bemerkungen zur Quantenmechanik freier Elektronen, in: Die Naturwissenschaften, Bd. 13 (1925), S. 711.

[6] Vgl. C. Davisson/L. H. Germer, Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel, in: Physical Review, vol. 30 (1927), p. 705—740.

Maxima. Ihr Bild erinnerte an die Streuung von Röntgenstrahlen an einem Kristall. Wenn auf einen Kristall Strahlen bestimmter Wellenlänge fallen würden, ergäbe sich ein gleiches Bild, wie es Davisson und Germer beobachtet haben (falls man gleichfalls den Brechungseffekt der Materiewellen berücksichtigt). Durch Ausmessung der Streumaxima der Elektronen konnte man ihre Wellenlänge bestimmen, und diese ergab sich in Übereinstimmung mit de Broglies Theorie zu $h/m \cdot v$.

Im Jahre 1928 untersuchte G. P. Thomson Durchgänge von Elektronen durch Metallfolien.[7] Er verwendete verhältnismäßig schnelle Elektronen (20—40 Kiloelektronenvolt), denen eine Materiewellenlänge von etwa 10 cm entspricht. Nach Durchgang durch die Folie fielen die Elektronen auf eine photographische Platte. Auf dieser erschienen Beugungsringe, wie beim Durchgang von Röntgenstrahlen durch die Folie. Aus den Ringdurchmessern wurde die Wellenlänge der de-Broglie-Wellen errechnet, und auch sie stimmten mit der Theorie überein. Ebensolche Versuche führte Tartakovskij 1927—1928 durch.[8] Auch sie und andere analoge Versuche bestätigten de Broglies Theorie.

4. Die Schrödinger-Gleichung

De Broglies Theorie macht den Weg für eine ganze Serie weiterer kühner Verallgemeinerungen in der Physik frei, die einander mit einer nicht für denkbar gehaltenen Geschwindigkeit folgten. Im Abstand von wenigen Monaten tauchten neue Gedanken auf, in denen sich zwei Epochen der Wissenschaftsgeschichte berührten: die alte, die ganze bisherige Physik umfassende und die neue. Bald erwiesen sich diese Ideen als Zugang zu einer noch radikaleren Vorstellung. Das Tempo der Fortschritte wurde immer größer und der Charakter der neuen Ideen immer entschiedener im Sinne einer Absage an die klassische Physik. Sogar die Genesis der Relativitätstheorie war zeitlich nicht derart konzentriert gewesen. Von der Bekanntgabe der speziellen Relativitätstheorie bis zu ihrer radikalen Verallgemeinerung waren immerhin zehn Jahre vergangen. In den dreißiger Jahren folgten dann bedeutende experimentelle Entdeckungen auf dem Gebiet der Physik der Atomkerne und Elementarteilchen und eine erweiterte Ausarbeitung der gewöhnlichen und relativistischen Quantenmechanik. Aber in den allgemeinen Prinzipien der physikalischen Theorie fehlten schon so radikale Umwälzungen wie jene aus der Zeit von 1925 bis 1927. Die auf relativ enge Grenzen beschränkte Entwicklung der Theorie machte anscheinend einer neuen kritischen Periode im zweiten Viertel des Jahrhunderts Platz. Darauf deutete eine Reihe von Symptomen hin, von denen weiter unten die Rede sein soll.

Die schnellste Entwicklung der Theorie begann fast ein Jahr nach der Publikation der de Broglieschen Doktorarbeit, als Heisenberg und Schrödinger mit ihren neuen Konzeptionen an die Öffentlichkeit traten.

[7] G. P. Thomson, Experiments on the Diffraction of Cathode Rays, in: Procedings of the Roy. Soc., vol. 117 (1928) p. 600—609.

[8] P. S. Tartakovskij, Экспериментальные основания волновой теории материи, Moskau/Leningrad 1932.

Heisenbergs Artikel[9] erschien Ende 1924 und der Schrödingers[10] Anfang 1925. Schrödingers Theorie stand den Ideen de Broglies nahe, führte sie direkt logisch fort.

Jede der bisher genannten aufeinander folgenden Konzeptionen war so revolutionär, daß sie auch noch heute als Anfang der Quantenmechanik bezeichnet werden könnte. Die Theorie Louis de Broglies hatte den Dualismus von Welle und Korpuskelaspekt der Materie als universale Idee des physikalischen Weltbildes eingeführt. Heisenberg, Born und Jordan entdeckten die Anwendbarkeit der Matrizenrechnung in der Quantenmechanik. Sie wurde zum spezifisch mathematischen Apparat der Quantenmechanik. Die Operatorenkalküle, die Theorie der Jordan-Diracschen Transformationen und das Unbestimmtheitsprinzip könnten einander gegenseitig den Titel der Anfangsentdeckung, von der ab die Zeitrechnung der Quantenmechanik zu beginnen hätte, streitig machen.

Mit gewissem Recht könnte man auch Schrödingers Theorie als Beginn der Mechanik der Mikrowelt ansehen, denn sie enthält die Grundgleichung dieser Mechanik. Die geschichtliche Rolle dieser Gleichung wird klar, wenn man sie mit den Grundgleichungen für die Bewegungen in der klassischen Physik vergleicht.

Mit diesen Gleichungen kann man die Koordinaten des Systems bestimmen, das heißt die Lage und die Impulse aller Teilchen des Systems, also den Zustand des Systems zu jedem beliebigen Zeitpunkt, falls man den Systemzustand zur Zeit $t = 0$ kennt. Darin besteht auch die klassische mechanistische Auffassung des Determinismus: Der Zustand des Systems in einem Moment bestimmt vollständig seinen Zustand in jedem folgenden Moment. Betrachte man die gesamte Natur als ein großes mechanisches System — und gerade das tat man im 17. und 18. Jahrhundert —, so tauchte der sogenannte Laplacesche Dämon auf.

Im 19. Jahrhundert erachteten die fortschrittlichen Denker die Natur schon nicht mehr als mechanisches System. Das wissenschaftliche Weltbild umschloß bereits komplizierte Bewegungsformen, die sich nicht auf die Veränderungen der Raumkoordinaten von Stoffteilchen reduzieren ließen.

Doch niemand bezweifelte im 19. Jahrhundert und zu Anfang des 20. Jahrhunderts, daß der Zustand eines mechanischen Systems zur Zeit $t = 0$ seinen Zustand in einem beliebigen späteren Zeitpunkt absolut genau vorherbestimmt. Niemand bezweifelte, daß der Systemzustand in jedem Moment in allen seinen charakteristischen Größen vollständig bestimmt ist.

Das Grundbild der klassischen Mechanik ist das Teilchen, das sich relativ zu einem Bezugskörper bewegt. Dieses Bild ist ein Produkt der kinetischen, dynamischen und atomistischen Ideen vom 17. bis zum 19. Jahrhundert und des gesamten klassischen Weltbildes. Die Wissenschaft des 17. und 18. Jahrhunderts

[9] W. Heisenberg, Über quantentheoretische Umdeutungen kinematischer und mechanischer Beziehungen, in: Zeitschrift für Physik, Bd. 33 (1925), S. 879—893.

[10] E. Schrödinger, Quantisierung als Eigenwertproblem. Erste Mitteilung, in: Annalen der Physik, Bd. 79 (1926), S. 361—376; zweite Mitteilung, ebenda, S. 489—527; dritte Mitteilung, ebenda, Bd. 80 (1926), S. 437—490; vierte Mitteilung, ebenda, Bd. 81 (1926), S. 109—139.

erstrebte ein Weltbild mit einer mechanischen Vorstellung sich bewegender Teilchen; im 19. Jahrhundert erkannte die Wissenschaft die Unmöglichkeit, komplizierte Bewegungsformen auf einfachere zu reduzieren. Aber wenn das klassische Weltbild sich auch nicht auf die mechanische Bewegung reduzierte, so war es doch von ihr nicht zu trennen.

Im neuen Weltbild ist die Vorstellung von Koordinaten eines materiellen Punktes, die in jedem Moment bestimmt sind und die sich in jedem Moment auf bestimmte Weise zeitlich verändern, nur mit wesentlichen Einschränkungen erhalten geblieben. In der Quantenmechanik wird der Zustand eines Systems durch eine Wellenfunktion beschrieben, mit deren Hilfe die *Wahrscheinlichkeit* für diesen oder jenen Systemzustand angegeben wird.

Die Gleichung, die Schrödinger 1925 fand, hatte einen Urtyp: die Wellengleichung der klassischen Physik. In ihr ist die Größe Ψ eine Funktion des Raumes und der Zeit. Aber die Wellengleichung war früher niemals als Gleichung für die Bewegung eines Teilchens betrachtet worden, man hatte auch niemals daran gedacht, daß die Wellenfunktion einmal die Aufgabe bekommen könnte, den Zustand eines Systems von Teilchen zu beschreiben. Doch eben das tat Schrödinger.

Sowohl in seiner wie in de Broglies Theorie erfolgte eine Synthese weitester Verallgemeinerungen der klassischen Mechanik (Prinzip der kleinsten Wirkung) und der Wellenoptik. In de Broglies Theorie figuriert die klassische Optik als geometrische Optik, welche das Fermatsche Prinzip befolgt. In der Theorie Schrödingers treffen wir die allgemeinere Wellenoptik, die das Huygenssche Prinzip erfüllt. Dieses Prinzip behauptet, daß jeder Punkt, den eine Welle erreicht, selbst zu einem Zentrum von Wellen wird, die sich nach allen Seiten ausbreiten. Huygens' Prinzip erklärt auch die geradlinige Ausbreitung des Lichtes in einem homogenen Medium sowie die Beugungserscheinungen. Der Übergang vom Fermatschen zum Huygensschen Prinzip bedeutet Veränderung der Methode, Wellenerscheinungen zu untersuchen. Gegeben sind uns lokale Charakteristiken — das Verhalten beziehungsweise der Zustand der Größe Ψ in unendlich kleinen Gebieten; genauer gesagt: es sind uns die Ableitungen dieser Größe gegeben, und wir bestimmen daraus die Ψ-Funktion. Mathematisch entspricht dies der Lösung von Differentialgleichungen.

Der Wellenprozeß wird durch eine Differentialgleichung beschrieben, in der auf der linken Seite die zweite Ableitung der Wellenfunktion Ψ nach der Zeit steht; auf der rechten die Summe der zweiten Ableitung von Ψ nach den Koordinaten, multipliziert mit dem Quadrat der Phasengeschwindigkeit u:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = u^2\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right).$$

Die Operation der zweifachen Ableitung einer Funktion nach den Koordinaten und die Summierung derselben wird mit dem Symbol Δ, dem Laplace-Operator, bezeichnet.

Mit diesem Symbol hat die gerade genannte Gleichung die Form:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} = u^2 \Delta \psi.$$

Sie beschreibt die Ausbreitung von Schwingungen der Größe ψ (das heißt von Wellen) mit der Phasengeschwindigkeit u.

Bei einer ebenen Welle kann man die zweite Ableitung der Wellenfunktion ψ nach der Zeit durch die Schwingungsfrequenz ν ausdrücken und danach zu den mechanischen Veränderlichen des Teilchens übergehen, deren Bewegung mit dem Wellenprozeß verbunden ist. Weiterhin kann man diese Veränderlichen durch die Gesamtenergie E und die potentielle Energie V ausdrücken, so daß die kinetische Energie gleich der Differenz beider ist:

$$mv^2/2 = E - V.$$

Nach mehrfacher Umformung erhält die Wellengleichung die Form:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\psi = 0.$$

Dies ist die Schrödinger-Gleichung für Teilchen. Sie war mit einer bestimmten physikalischen Hypothese verknüpft. Für Schrödinger sind nur die Wellen real. Sie liegen allen korpuskularen Erscheinungen zugrunde. Er schrieb, es sei möglich, in Hamiltons Prinzip ebenfalls das Resultat eines Spiels von Wellen zu sehen, genauso wie wir seit langem gewohnt sind, in den Erscheinungen des Lichtes mit ihrem Fermatschen Prinzip Wellen zu sehen.[11]

Eine physikalische Interpretation der Schrödinger-Gleichung konnte nicht sogleich gefunden werden. Der Weg zu ihr war lang und kompliziert. Als unmittelbarer Effekt ergab sich aus Schrödingers Theorie die Möglichkeit, die Energie zu quanteln, also diskrete Energiewerte zu erhalten.

Die physikalische Vorstellung der Diskretheit der Energie forderte eine adäquate mathematische Vorstellung. Bis dahin war die Diskretheit nur als Teilidee aufgetreten. Sie hatte einige Besonderheiten der Spektren, Eigenschaften der Strahlung und der Struktur der Atome erklärt. Einstweilen konnte man sich mit der willkürlichen Auswahl der Quantenbahnen in Bohrs Modell zufriedengeben. Die Forderung nach einem allgemeinen mathematischen Apparat, der von sich aus diskrete Lösungen ergab, war noch nicht allzu drängend. Als man aber begann, die Elektronenbahnen mittels allgemeiner, die ganze Natur umfassender physikalischer Beziehungen zu erklären, veränderte sich die Lage. Woher konnte man die Methode zum Quanteln nehmen? Der mathematische Apparat der Theorie Schrödingers war der erste Schritt vorwärts. Schrödinger lenkte die Aufmerksamkeit auf eine Klasse von Aufgaben aus der Theorie der Differentialgleichungen.

[11] E. Schrödinger, Quantisierung als Eigenwertproblem. Zweite Mitteilung, a. a. O., S. 489f.

Stellen wir uns eine Differentialgleichung vor, in die erstens gewisse Parameter, zweitens Funktionen der Raumkoordinaten eingehen. Bei gewissen Werten der Parameter hat die Differentialgleichung eine endliche, eindeutige und stetige Lösung. Wir erhalten eine stetige und eindeutige Funktion der Koordinaten im ganzen Raum, deren Werte in jedem Raumpunkt endlich sind.

Eine solche Lösung der Differentialgleichung nennt man Eigenfunktion, und die diskreten Werte der Parameter, bei denen solche Lösungen möglich sind, nennt man die Eigenwerte der Gleichung.

In der Schrödinger-Gleichung für ein Teilchen ist die Gesamtenergie des Teilchens E ein konstanter Parameter und die potentielle Energie V eine Funktion der Koordinaten, wechselnd von Punkt zu Punkt. Eindeutige, stetige und endliche Lösungen der Gleichung erhält man, wenn die Gesamtenergie negativ wird und diskrete Werte annimmt.

Solange es nur um ein Teilchen geht, bewahrt die Wellenfunktion einen direkten physikalischen Sinn. Man kann sich vorstellen, daß sich Wellen im Raum ausbreiten, die auch bestimmte Effekte in der Bewegung des Teilchens bestimmen, das in seiner Geschwindigkeit durch de Broglies Beziehung mit der Phasengeschwindigkeit der Wellen verbunden ist. Schrödingers Theorie verlor insoweit nicht die Anschaulichkeit, die de Broglies Wellenmechanik eigen ist. Wenn es aber um mehrere Teilchen geht, so ändert sich die Lage. Eine Verallgemeinerung der Gleichung wird erforderlich. Sie erhält die Gestalt

$$\frac{1}{m_1} \Delta_1 \psi + \frac{1}{m_2} \Delta_2 \psi + \cdots + \frac{8\pi^2}{h^2} (E - V) \psi = 0,$$

wobei $m_1, m_2 \ldots$ die Masse der bewegten Teilchen und Δ_i die entsprechenden Laplace-Operatoren sind. Die Wellenfunktion ist nun nicht mehr eine Funktion der drei Raumkoordinaten und der Zeit, sondern einer großen Zahl von Veränderlichen. Jedes Teilchen bewegt sich unabhängig von den drei Raumdimensionen, repräsentiert somit drei Veränderliche. Bei n Teilchen liegen also $3n$ Veränderliche vor. Das ergibt, wenn man auf die entstandene Menge geordneter Systeme, deren jedes aus $3n$ Zahlen besteht, geometrische Beziehungen anwenden will, einen $3n$-dimensionalen Koordinatenraum. Wir bezeichnen ihn als Konfigurationsraum und vermerken, daß die Wellengleichung beim Übergang zum Konfigurationsraum ihre Anschaulichkeit verliert. Im übrigen sind physikalische Vorstellungen ja nie unmittelbar anschaulich. Die Wissenschaftsgeschichte zeigt, welche Anstrengungen des abstrakten Denkens nötig waren, damit die Begriffe der klassischen Physik Anschaulichkeit erwarben (das beginnt mit der Isotropie des Raumes und den nicht „nach unten“ fallenden Antipoden). Andererseits ist jeglicher physikalischen Theorie Anschaulichkeit eigen, wenn sie das vierdimensionale Raumzeitkontinuum gegenüber irgendwelchen konstruierten „Räumen“ auszeichnet. Prinzipielle Anschaulichkeit ist ein Pseudonym für physikalische Interpretierbarkeit. Es gibt nämlich offensichtlich uninterpretierbare, fiktive Konstruktionen; diese haben keine prinzipielle Anschaulichkeit. Aber die relativ

unanschaulichen symbolischen Konstruktionen erlangen im Lauf der Zeit eine physikalische, raumzeitliche Interpretation und werden Elemente des Weltbildes. Darin liegt eine wesentliche Seite des wissenschaftlichen Fortschrittes. Mehr noch, die weitgehende Benutzung offensichtlich konstruierter „Räume" erlaubt früher oder später, die betreffenden Symbole vollständiger und konkreter zu interpretieren.

5. Matrizen und Operatoren

Die Theorie Schrödingers war hinsichtlich der Benutzung von Symbolen ein großer Schritt vorwärts. Aber noch größer war in dieser Hinsicht ein Aufsatz Heisenbergs, der wenige Monate nach Schrödingers Artikel erschien.

Dieser Artikel Heisenbergs[12] beginnt mit der Behauptung: In die Theorie der Mikrowelt dürfen nur beobachtbare Größen eingehen.

Die Theorie von Bohr berechnet die Energie wasserstoffähnlicher Atome und andere beobachtbare Größen mit Hilfe von unbeobachtbaren Größen, vor allem der Lage und Umlaufperiode des Elektrons. Aber die Regeln dieser Theorie sind nur für den einfachsten Fall geeignet, für Mehrelektronensysteme und andere komplizierte Bedingungen hingegen nicht. „Diese Bezeichnung", schreibt Werner Heisenberg, „kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) *Einstein-Bohrsche* Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an eine Gültigkeit der klassischen Mechanik schlechterdings nicht gedacht werden kann."[13]

Nach Heisenberg ist die Unzulänglichkeit der Quantentheorie im Gegenteil durch die Anwendung der nichtbeobachtbaren klassischen Bilder von Lage und Periode des im Atom umlaufenden Elektrons hervorgerufen. An Stelle der Regeln für letztere braucht man eine Quantenmechanik, die der klassischen Mechanik analog ist und nur Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen verwendet.

Auf den ersten Blick scheint diese Forderung Heisenbergs den Tendenzen de Broglies und Schrödingers entgegengesetzt zu sein. Die Schöpfer der Wellenmechanik strebten danach, die Gesetze der Mikrowelt aus dem seinem Wesen nach klassischen Modell der Materiewellen usw. abzuleiten. Die Schöpfer der Quantenmechanik, in erster Linie Heisenberg, erstrebten eine radikale Absage an die klassischen Vorstellungen, die ein Bild von einem Elektron, das sich im Atom auf einer bestimmten Bahn mit einem bestimmten Impuls bewegte, implizierten. Heisenberg und Schrödinger kamen zu äquivalenten Auffassungen, was sich schon 1926 zeigte. Aber für uns ist heute klar, daß die Äquivalenz der *Re-*

[12] W. Heisenberg, Über quantentheoretische Umdeutungen kinematischer und mechanischer Beziehungen, a. a. O., S. 879.
[13] Ebenda, S. 879–880.

sultate beider schon in ihren *Ansätzen* enthalten war, die einander äußerlich allerdings widersprachen. De Broglie und Schrödinger wollten die paradoxen Bohrschen Bedingungen aus klassischen Ideen herleiten. Sie sahen in der klassischen Wellentheorie Analogien und Modelle, mittels welcher man diskrete physikalische Größen erhalten konnte. Die Theorie der Differentialgleichungen gab die mathematischen Methoden zu ihrer Berechnung. Heisenberg stellte sich ein analoges Ziel: Er suchte Wege zum Übergang von den klassischen kontinuierlichen Begriffen der Atommechanik zu diskreten, quantisierten. Schon in der ersten Variante der Quantenmechanik, in der Heisenberg noch ohne Matrizen arbeitete, wollte er die ihrem Wesen nach kontinuierliche Position der Elektronen durch diskrete Quantengrößen ersetzen.

Obwohl das klassische Bild paradoxe Quantenbedingungen als Einschränkungen enthielt, stattete es die den Kern umlaufenden Elektronen mit den klassischen Eigenschaften der räumlichen Lokalisation und der Individualität aus. Dieses Bild erwies sich nun als unzulänglich. De Broglie und danach Schrödinger ersetzten das Elektron durch eine Wellengruppe. Heisenberg ging einen anderen Weg. Er betrachtete die Schwingung der Koordinaten des Elektrons. Man muß sie durch eine andere Vorstellung ersetzen, aus der sich dann die Quantenbedingungen ergeben. Die Schwingungen der Koordinaten des Elektrons, das heißt einen „prinzipiell beobachtbaren Vorgang", konnte man gemäß der Theorie Fouriers in eine Reihe harmonischer Schwingungen zerlegen.

Die Aufgabe Heisenbergs bestand darin, von den Koordinaten des bewegten Elektrons zu den Energieniveaus des Atoms und den Frequenzen und Intensitäten der Spektrallinien überzugehen. Ein solcher Übergang besteht auch in der klassischen Theorie. Diese verknüpft den Elektronenumlauf mit den beobachtbaren Frequenzen und Amplituden der elektromagnetischen Wellen, die das Elektron bei seinem Umlauf ausstrahlt. Wenn alle Amplituden und Frequenzen der ausgestrahlten Wellen vorgegeben sind und folglich auch alle Fourier-Koeffizienten vorliegen, kann man die Umlaufbahn des Elektrons eindeutig bestimmen.

In der Quantenmechanik ist die Lage etwas anders. Auch hier kann man die Gesamtheit der Amplituden und Frequenzen der Strahlung als vollständige Charakteristik des atomaren Systems ansehen. Aber man kann sie nicht als Ergebnis der Bewegung des Elektrons entlang seiner Umlaufbahn auffassen. Heisenberg schlägt vor, an Stelle der Fourier-Koeffizienten bei der Zerlegung der klassischen Schwingung des Elektrons Größen einzuführen, die diesen klassischen Koeffizienten zwar entsprechen, aber doch etwas wesentlich anderes sind.

Der Hauptunterschied zwischen diesen Größen und den Fourier-Koeffizienten besteht darin, daß jeder von diesen Größen *zwei* stationäre Zustände zugeordnet sind. In der neuen Auffassung entspricht jeder Koeffizient q einem Übergang des Atoms aus dem Zustand n in den Zustand m.

Aus der Vorstellung Bohrs, daß einer Spektrallinie, also einer bestimmten Frequenz, die Differenz zweier Energieniveaus entspricht, ergab sich die Möglichkeit, diese Niveaus in einem horizontal-vertikalen Schema aufzuzeichnen. Heisenberg verwirklichte diese implicite in Bohrs Theorie enthaltene Idee. Er stellte die Zustände des Atoms und die Übergänge zwischen ihnen in einer rechteckigen Tabelle

dar. Jede Zelle derselben — entstanden durch Kreuzung einer Zeile mit einer Spalte — entsprach einem Übergang aus einem stationären Zustand in einen anderen. Die Ersetzung der Reihen der Energie- und sonstigen Differenzen durch solche quadratische Tabellen sowie die Darstellung physikalischer Beziehungen durch zwei Mengen sind eine charakteristische Besonderheit der Theorie Heisenbergs. Jeder dynamischen Variablen entspricht eine Tabelle, in der die in den Zellen stehenden Koeffizienten den Veränderungen der Variablen beim Übergang des Atoms aus einem Zustand in einen anderen entsprechen. Die Zellen, die die von links nach rechts verlaufende Diagonale bilden, entsprechen Übergängen in denselben Zustand, das heißt den stationären Zustand. Als Heisenberg zu diesen Vorstellungen kam, wußte er nicht, daß er Begriffe benutzte, die ihr äußerst genaues Äquivalent in der um 1850 geschaffenen mathematischen Theorie der Matrizen hatten. Born und Jordan entdeckten sehr schnell, daß die Matrizen den mathematischen Apparat der Theorie Heisenbergs bildeten. Die Tabellen der doppelten Koeffizienten erhielten eine kanonische Benennung, und die Quantenmechanik konnte das System der Begriffe und Theorien, das schon ausgearbeitet und gut begründet war, benutzen.

In seinem anläßlich der Verleihung des Nobelpreises gehaltenen Vortrag „Die statistische Interpretation der Quantenmechanik“ erzählte Born, daß sich Heisenberg im Sommer 1925 wegen einer Erkrankung zu einem Kuraufenthalt an die See begeben und ihm zuvor einen Artikel übergeben hatte, den Born veröffentlichen sollte, falls er ihm gefiele. Born las ihn durch und sandte ihn an die „Zeitschrift für Physik“. Bei der Lektüre erinnerte er sich einer algebraischen Theorie, mit der er lange zuvor während seiner Studienjahre in Breslau bekannt geworden war. Born sah, daß die quadratischen Tabellen Heisenbergs Matrizen entsprachen. Jedoch blieben einige Momente unklar. Born zog seinen Schüler Pasqual Jordan zur Mitarbeit heran, und bald erschien in der gleichen Zeitschrift eine gemeinsame Arbeit.[14] Innerhalb kurzer Zeit gaben Born, Jordan und Heisenberg — mit dem die beiden in brieflicher Verbindung standen — der Theorie eine verhältnismäßig endgültige Form und legten sie in einer „Drei-Männer-Arbeit“ als Artikel vor.[15] Die Arbeit war noch nicht erschienen, als Dirac seine Arbeit publizierte, in der die Tabellen Heisenbergs als mathematische Symbole mit Eigenschaften behandelt wurden, die denen der Matrizen analog waren.[16] Dirac wurde mit Heisenbergs ersten Ideen durch P. Kapica bekannt, der im Sommer 1925 Heisenberg in sein Cambridger Laboratorium eingeladen hatte. Heisenberg erinnerte sich später der Initiative Kapicas, seines Vortrages in Cambridge und der Arbeit des jungen, erst 23jährigen Studenten Dirac als eines charakteristischen Beispiels internationaler wissenschaftlicher Zusammenarbeit.[17]

[14] M. Born/P. Jordan, Zur Quantenmechanik, in: Zeitschrift für Physik, Bd. 34 (1925), S. 858—888.
[15] M. Born/W. Heisenberg/P. Jordan, Zur Quantenmechanik II. in: Zeitschrift für Physik, Bd. 35 (1926), S. 557—615.
[16] P. A. M. Dirac, in: Proc. Roy. Soc., vol. 108, 1925, p. 642ff.
[17] W. Heisenberg, Wissenschaft als Mittel zur Verständigung unter den Völkern, in: Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft, 8. Aufl., Stuttgart 1949, S. 104—105.

Heisenberg, Born und Jordan legten die Quantenmechanik in Form einer Matrizenalgebra dar. Hier genügt es, auf die Unvertauschbarkeit der Faktoren bei der Matrizenmultiplikation hinzuweisen. Wenn wir die Matrix p mit der Matrix q multiplizieren, so erhalten wir gewöhnlich ein anderes Ergebnis, als wenn wir die Matrix q mit der Matrix p multiplizieren. Solche nichtkommutative Produkte qp und pq spielen in der Matrizenrechnung eine erstrangige Rolle. Nimmt man die Matrix q, die den Koordinaten des Elektrons entspricht, und die Matrix p, die seinen Impuls darstellt, so besteht zwischen den Matrizenprodukten qp und pq die Beziehung

$$qp - pq = h/2\pi i.$$

Sie heißt *Vertauschungsrelation.* Ihre Ergebnisse koinzidieren mit den Ergebnissen, zu denen Schrödinger gekommen war. In Sonderheit kamen Heisenberg, Born und Jordan zu der Frequenzbedingung, die Bohr seinerzeit formuliert hatte:

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}.$$

Die Quantenmechanik Heisenbergs, Borns und Jordans leitete die Frequenzbedingungen aus dem diskreten Charakter der dynamischen Größen des Atoms ab. In den Theorien de Broglies und Schrödingers war der Weg gerade umgekehrt; die optische Diskontinuität, die Existenz des Wirkungsquantums als optische Konstante waren hier die Ausgangspunkte, aus ihnen wurde die Quantisiertheit der Elektronenbahnen abgeleitet. Das Bohrsche Modell erklärte wegen seines Übergangscharakters die in der Atommechanik vorkommenden optischen Konstanten nicht. Das Wirkungsquantum existierte in der Theorie der Spektren als optische Konstante und als mechanische in der Atommechanik. Seit 1925 vereinigen sich beide Bereiche nicht nur im Sinne eines Zusammenfallens von optischer und mechanischer Fundamentalkonstante. In der Wellenmechanik ergibt sich die dynamische Bedeutung von h aus der spektralen, in der Quantenmechanik Heisenbergs ist es umgekehrt.

Ende 1925 kam Born, der sich damals auf Einladung des Massachusetts Institut of Technology in den USA aufhielt und mit Norbert Wiener zusammenarbeitete, der Gedanke, man könnte die physikalischen Größen als Operatoren auffassen. In einem 1926 gemeinsam mit Wiener veröffentlichten Artikel zeigte er, daß man jede Variable mit einem Operator verbinden kann, so wie man sie wenig früher mit Matrizen verbunden hatte.[18] Seit jener Zeit ist die Operatorenrechnung ein mathematisches Hauptmittel der Atomphysik geworden und hat mannigfache Weiterentwicklungen und Anwendung erfahren.

Die Theorie der linearen Operatoren illustriert recht charakteristisch die Entwicklungsgesetzmäßigkeiten der Physik. Die historische Verbindung physikalischer

[18] Vgl. M. Born/N. Wiener, Eine neue Formulierung der Quantengesetze für periodische und nichtperiodische Vorgänge, in: Zeitschrift für Physik, 36 (1926), S. 174—187.

Theorien miteinander ist nicht immer direkt. Manchmal veranlaßt eine physikalische Theorie die Mathematik dazu, ein System neuer Begriffe zu schaffen, die einstweilen physikalisch uninterpretiert bleiben, dann benutzt eine andere physikalische Theorie diese Begriffe und gibt ihnen einen physikalischen Sinn. Etwa um 1900 kamen unter dem Einfluß der Entwicklung der klassischen Physik, der Mechanik und der Astronomie die Mathematiker zu einer Verallgemeinerung des Grundbegriffes der Analysis, des Funktionsbegriffes. Wenn man unter der Funktion $y = f(x)$ die Zuordnung zwischen der Menge der Zahlen x und der Menge der Zahlen y versteht, so kann man von allgemeineren Zuordnungen sprechen, die nicht zwischen Zahlen, sondern zwischen Funktionen bestehen. Diese Zuordnungen nennt man Operatoren. Ein Operator ist dann gegeben, wenn eine Gesetz bekannt ist, nach welchem der Funktion $f(x)$ eine andere Funktion $\varphi(x)$ zugeordnet wird. Operatoren sollen im weiteren hier mit Buchstaben bezeichnet werden, denen das Zeichen ^ aufgesetzt ist, zum Beispiel $\hat{L}$. Wir können als zweite Funktion $\varphi(x)$ die Funktion $f(x)$, multipliziert mit der Veränderlichen x nehmen, aber auch multipliziert mit einer Konstanten α oder die Ableitung von $f(x)$ usw. In allen diesen Fällen wird der Übergang von $f(x)$ zu $\varphi(x)$ durch ein entsprechendes $f(x)$ vorgestelltes Symbol bezeichnet. Im ersten Falle ist $\hat{L}_1 f(x) = \varphi(x) = x f(x)$; im zweiten Falle ist $\hat{L}_2 f(x) = \varphi(x) = \alpha f(x)$; und im dritten Falle ist $\hat{L}_3 f(x) = \varphi(x) = \partial f(x)/\partial x$. Wir können auf eine Funktion mehrere Operatoren hintereinander anwenden, etwa erst $\hat{L}_1$, danach $\hat{L}_2$. Das Nacheinander-Anwenden von Operatoren nennt man ihre Multiplikation. Die Operatorenmultiplikation ist im allgemeinen nicht kommutativ. Die in den beiden ersten Beispielen angewendeten Operatoren sind kommutativ, das heißt, sie haben eine kommutative Multiplikation: Eine Funktion kann man erst mit ihrer Veränderlichen und dann mit einer Kostanten multiplizieren, oder auch umgekehrt; man erhält beide Male dasselbe Resultat. Aber die Multiplikation des Operators Differentiation und des Operators Multiplikation mit der Veränderlichen x sind nicht kommutativ.

Besonders wichtig für die Quantenmechanik sind die Begriffe der *Eigenfunktion* und des *Eigenwertes eines Operators*. Die Wirkung eines Operators $\hat{L}$ auf seine Eigenfunktion reduziert sich auf eine Multiplikation mit einem Faktor λ. In diesem Falle nennt man λ den Eigenwert des Operators $\hat{L}$. In bezug auf seine Eigenfunktion entsymbolisiert sich ein Operator gewissermaßen. Das Symbol $\hat{L}$, das eine bestimmte Operation bedeutet, wird durch einen gewöhnlichen Faktor ersetzt: $\hat{L} f = \lambda f$. Die Eigenwerte des Operators bilden sein Spektrum: entweder ist dies stetig (etwa alle reellen Zahlen), oder es ist unstetig (etwa alle ganzen Zahlen).

Wenden wir uns nun wieder physikalischen Problemen zu. In der Quantenmechanik werden Operatoren zur Darstellung dynamischer Veränderlicher verwandt: Koordinaten, Komponenten, Energie, Impuls usw. Durch den Übergang von gewöhnlichen Größen zu Operatoren wird es möglich, einen Kompromiß zwischen den neuen nichtklassischen Begriffen und der klassischen Mechanik zu schließen, deren Schemata auf die Mikrowelt zu übertragen und somit in diesem Gebiet die Begriffe Teilchenkoordinate, Impulskomponente und andere dynamische Größen zu verwenden. Wenn jeder der Veränderlichen ein Operator zu-

geordnet wird, wenn diese Operatoren klassischen Relationen zwischen den zugehörigen Größen untergeordnet werden, dann kommt man zu den Relationen der Quantenmechanik. Folglich entspricht der Übergang zu Operatoren spezifischen Quantenrelationen und damit letztlich bestimmten Gesetzmäßigkeiten der Mikrowelt. Dieser Übergang erlaubt, die Quantenrelationen in die Sprache der klassischen Relationen zu übersetzen.

Die dynamischen Veränderlichen werden durch Operatoren dargestellt. Dies ist die erste Annahme der Quantenmechanik. Die zweite betrifft die physikalische Interpretation der Operatoren und bezieht sich auf die Eigenwerte λ und die Eigenfunktionen f eines Operators $\hat{L}$. Wenn die Variable L durch einen Operator $\hat{L}$ dargestellt wird, so bezeichnet der Eigenwert des Operators eine bestimmte Zahl, die wir erhalten, wenn wir die Variable L in demjenigen Systemzustand messen, der durch die Eigenfunktion f dargestellt wird. Diese Eigenfunktion beschreibt den Zustand des Systems, in welchem L einen bestimmten Wert hat. Dies ist die Ausgangsthese der Quantenmechanik.

6. Wahrscheinlichkeitswellen

Die Modifikation der klassischen Begriffe beim Übergang in den neuen Bereich besteht vor allem darin, daß sie im allgemeinen ihre Bestimmtheit verlieren (im Sonderfall der Eigenzustände trifft das nicht zu). Das Quadrat der Wellenfunktion drückt die *Wahrscheinlichkeit* für das Vorliegen bestimmter Werte klassischer dynamischer Variabler aus. Diese Interpretation der Wellenfunktion gab Born 1926.[19]

Born betrachtet den $3n$-dimensionalen Konfigurationsraum. Ein Punkt in ihm wird durch ein $3n$-Tupel bestimmt, da dieser Raum $3n$ Koordinaten besitzt. Der Wert der Wellenfunktion ändert sich von Punkt zu Punkt. Der physikalische Sinn dieser Funktion ist die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Konfiguration der Teilchen, die Wahrscheinlichkeit ihrer Realisierung.

Diese ganze Konstruktion ist für den Fall von nur einem Teilchen am einfachsten, wenn die Wellenfunktion durch die nichtverallgemeinerte Schrödinger-Gleichung gegeben ist. Der Konfigurationsraum wird dann durch den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum ersetzt, und die Wellenfunktion hat in jedem Punkt dieses Raumes einen bestimmten Wert. Ein unendlich kleiner Zuwachs des Koordinatenwertes entspricht einem unendlich kleinen Zuwachs der Wellenfunktion. Sie ist somit stetig. Ihr Quadrat drückt die *Wahrscheinlichkeit dafür aus, im gegebenen Punkt ein Teilchen anzutreffen.*

All dies kann man mit folgendem Beispiel erklären: Ein Strom paralleler und gleichschneller Elektronen durchfliege zwei enge Spalten in einem undurchsichtigen Schirm und falle danach auf einen Fluoreszenzschirm. Falls die Elektronen Teilchen im klassischen Sinne sind, müssen sich auf dem Fluoreszenzschirm

[19] M. Born, Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge, in: Zeitschrift für Physik, Bd. 37 (1926), S. 863–867; Bd. 38 (1926), S. 803.

dort, wo die Elektronen auffallen, zwei leuchtende Streifen bilden. Tatsächlich aber erscheinen auf diesem Schirm Interferenzstreifen. Sie kann man analog zu Youngs Interferenzversuch, dem klassischen Beweis für die Wellennatur des Lichtes, erklären. Die beiden vorgenannten Spalten wirken als Quellen zweier Kugelwellen, die auf jeden Punkt des Auffangschirmes fallen. Dort, wo die Phasendifferenz der beiden Wellen einem geradlinigen Vielfachen der halben Wellenlänge gleich ist, fallen die Phasen beider Wellen zusammen, und die Summe der Amplituden ist ein Maximum; dort aber, wo jenes Vielfache ungeradlinig ist, ist die Summe beider Amplituden Null, daher sieht man an diesen Stellen dunkle Interferenzstreifen. Vom Korpuskelbild der Elektronen aus kann dieser Versuch so erklärt werden: Helle Streifen erhält man dort, wo die meisten Elektronen auftreffen; dunkle dort, wo überhaupt keine auftreffen. Eine maximale Amplitude entspricht also einer maximalen Dichte der auf den Schirm fallenden Elektronen. Das Amplitudenquadrat, also immer eine positive Größe, kann man als Wahrscheinlichkeit des Auftreffens eines Elektrons auffassen. Bei einer großen Zahl Elektronen im Strahl entspricht ihre Dichte in einem gegebenen Aufschlagpunkt auf dem Schirm der Wahrscheinlichkeit, hier jedes Elektron zu treffen.

Stellen wir uns nun vor, daß ein Elektron nach dem anderen die beschriebene Versuchsanordnung durchfliegt. Wenn wir für jedes den Auftreffort vermerken, stellen wir nach einer großen Zahl von Versuchen fest, daß die meisten Elektronen in jenen Orten aufgetroffen sind, wo sich infolge Superposition der beiden Wellen die Punkte maximaler Amplituden befinden, die von den beiden Spalten ausgehen. Die Zahl der im Durchschnitt auffallenden Elektronen entspricht überall dem Amplitudenquadrat. Was verbreitet sich eigentlich wellenförmig im Falle *eines einzigen* Elektrons? Was verteilt sich dann in diesem Falle über den ganzen Schirm? Borns Antwort lautet: Es ist die *Wahrscheinlichkeit* für das Auftreffen eines Elektrons auf diesen oder jenen Schirmpunkt, die sich wellenförmig ausbreitet, überlagert usw.

Diese Ansicht ergibt sich aus der Auffassung der physikalischen Größen als Operatoren. Wir erinnern an die physikalische Interpretation der Eigenwerte des Operators $\hat{L}$, die durch die Gleichung

$$\hat{L}\psi_n = \lambda_n \psi_n$$

bestimmt wird. Hier ist λ_n das *eindeutige und bestimmte* Resultat der Messung der Veränderlichen L, die in dem Moment ausgeführt worden ist, wo sich das System im Zustand ψ_n befand.

Es ist hier von den Eigenwerten des Operators $\hat{L}$ und denjenigen Zuständen die Rede, wo die Veränderliche L eindeutig bestimmt werden kann. Kann man auch den anderen hiervon verschiedenen λ-Werten einen physikalischen Sinn beilegen? Nehmen wir an, daß derartige Werte dem mittleren Ergebnis einer großen Zahl von Messungen der Veränderlichen L entsprächen. Den Zuständen, für die L nicht eindeutig bestimmt werden kann, kann somit wenigstens die *Wahrscheinlichkeit* eines gegebenen Wertes der Veränderlichen eindeutig zugeordnet werden. In diesem Fall bestimmt λ die *mathematische Erwartungswahrscheinlichkeit*. Ihrem

Wert nähert sich der mittlere Wert der Veränderlichen um so mehr an, je häufiger sie gemessen wird.

Als Beispiel möge die Bestimmung des mittleren Wertes der Koordinate x dienen. Operator $\hat{L}$ ist also die Koordinate x. Das Quadrat der Wellenfunktion ist nun die Wahrscheinlichkeitsdichte für den Aufenthalt des Teilchens an einem bestimmten Ort. Je größer der Wert der Wellenfunktion, genauer gesagt, das Quadrat ihres Moduls im Intervall dx, um so größer die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in jenem Intervall anzutreffen. Im angeführten Zweispaltenexperiment war all dies sehr anschaulich. Wo die Wellenfunktion maximal war, erreichte auch die Elektronendichte ihr Maximum. Wenn nur ein Elektron die Anordnung durchflog, so entsprachen die Punkte, für die $|\psi|^2$ maximal ist, der höchsten Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Elektron in ihnen auftrifft. Wir wiederholen die beiden Annahmen, die den Operatoren und Wellenfunktionen einen physikalischen Sinn geben. Die erste kann man kurz so formulieren: Die Eigenwerte des Operators sind bestimmte Werte der Variablen. Die zweite: Alle Werte des Operators sind Mittelwerte der Variablen.

Die erste Annahme läßt sich aus der zweiten ableiten; aber das Umgekehrte ist nicht möglich. Es fragte sich nun, ob dieser eben angeführten asymmetrischen Relation eine bestimmte Relation zwischen physikalischen Prozessen entspricht. Sind die realen „Zustände der Unbestimmtheit" die allgemeinen Fälle und die „Zustände der Bestimmtheit" die besonderen?

In der Quantenmechanik konstatiert man ein Zusammenfallen der Beziehungen zwischen den mittleren Werten, die im allgemeinen in jedem Einzelzustand des Systems unbestimmt sind, mit den Beziehungen zwischen bestimmten klassischen Variablen. Ehrenfest hat gezeigt, daß die Mittelwerte der dynamischen Variablen in mikroskopischen Systemen die Gleichungen der klassischen Mechanik befolgen. Mikrosysteme sind danach Systeme, in denen die Ergebnisse einzelner Messungen von der klassischen Eindeutigkeit abweichen; wo die Einzelwerte physikalischer Größen durch die Quantengleichungen bestimmt werden, die Mittelwerte hingegen klassischen Beziehungen unterliegen. Ehrenfests Theorem ist ein quantenmechanisches Theorem, das sehr deutlich seine Beziehung zur klassischen Mechanik, seinen logischen Ort zwischen dem klassischen Weltbild und jener Vorstellung zeigt, die die klassische Kontinuität und Diskontinuität radikal überwindet.

7. *Unbestimmtheit und Komplementarität*

Matrizen und Operatoren erlauben, Prozesse in der Mikrowelt mit klassischen Begriffen zu beschreiben. Sie zeigen aber auch die Anwendungsgrenzen klassischer Begriffe für diesen Bereich. Wir können von der Lage und dem Impuls von Teilchen und von ihrer Energie in einem festgelegten Zeitpunkt sprechen, wenn die Operatoren der betreffenden Variablen kommutativ sind. Im allgemeinen sind sie es aber nicht. Wenn die Eigenfunktionen λ_n des Operators $\hat{L}$ (wenn L genau bestimmt werden kann) den einen Zuständen und die Eigenfunktionen μ_n des

Operators $\hat{M}$ den anderen Zuständen entsprechen, dann können die Variablen L und M nicht in einem Versuch mit unbegrenzter Genauigkeit bestimmt werden. Im allgemeinen bestimmt die Funktion λ nur die Wahrscheinlichkeit dieser oder jener Werte der dynamischen Variablen und somit den Mittelwert von sehr vielen Messungen. Die Operatorauffassung erlaubt, die Frage, ob zwei dynamische Variablen gleichzeitig genau gemessen werden können, allgemein zu lösen. Dies ist möglich, wenn die beiden Operatoren $\hat{L}$ und $\hat{M}$ gemeinsame Eigenfunktionen haben, wenn also

$$\hat{L}\psi_n = \lambda_n \psi_n; \quad \hat{M}\psi_n = \mu_n \psi_n.$$

Dann haben L wie auch M in denselben Zuständen bestimmte Werte λ_n und μ_n. Natürlich werden hier keine für die Theorie unwesentlichen experimentellen Mängel berücksichtigt, etwa Schwankungen irgendwelcher Faktoren, Beobachtungsfehler und dergleichen. Die Kommutativität der Operatoren drückt sich durch die Möglichkeit aus, die den beiden Operatoren entsprechenden Variablen gleichzeitig genau zu messen. Sind die Operatoren nicht kommutativ, fehlen gemeinsame Eigenfunktionen, so gibt es keine Systemzustände, bei denen die Variablen gleichzeitig genau bestimmbare Werte haben. Solche Variablen sind zum Beispiel die x-Koordinate und die Impulskomponente längs der x-Achse. Die sie darstellenden Operatoren $\hat{x}$ und $\hat{p}_x$ sind nicht kommutativ. Ihre Produkte unterscheiden sich voneinander. Für sie gilt

$$\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = h/2\pi i.$$

Wie kann man diese Vertauschungsrelation mit der Möglichkeit vereinbaren, die Begriffe Impuls und Lage auf ein Teilchen anzuwenden?

Heisenberg hat gezeigt, daß die Vertauschungsrelation angewendet werden kann, wenn man eine gewisse Unbestimmtheit der Werte der Koordinaten und Impulskomponenten des Teilchens annimmt. Die Unbestimmtheit der Messung von x wird mit Δx bezeichnet und die Messung von px mit Δp_x.

Dann drückt sich die Unbestimmtheitsrelation durch die Ungleichung

$$\Delta x \, \Delta px \geq \frac{h}{4\pi}$$

aus. Analoges gilt für y mit p_y und z mit p_z:

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}, \quad \Delta e \Delta p_z \geq \frac{h}{4\pi}.$$

Der Sinn der Ungleichung Heisenbergs ist offensichtlich: Wenn man die Genauigkeit der Messung der Impulskomponente vergrößert, so vermindert sich die Genauigkeit der Messung der Koordinate und umgekehrt.

In Heisenbergs und Bohrs Arbeiten aus dem Jahre 1927 wird das Unbestimmtheitsprinzip aus allgemeinen Überlegungen über Messungen und die Einwirkung der Messung auf das gemessene Objekt abgeleitet. Diese Überlegungen verlaufen etwa nach folgendem Schema: Dem Meßobjekt steht das Meßgerät gegenüber. Dieses wirkt auf das Meßobjekt ein. Ebenso wirkt das Meßobjekt auf das Meßgerät. Die Messung besteht in gerade genannter Wechselwirkung, sie bedeutet daher ihrer Natur nach eine Veränderung des Meßobjektes. In der Makrowelt kann man diese Veränderung vernachlässigen; in der Mikrowelt ist sie wesentlich. Wir betrachten als Tatbestand die Einwirkung der Koordinatenmessung bei einem Teilchen auf dessen Impuls und die Einwirkung von Impulsmessungen auf die Koordinaten.

Es mögen die Koordinaten x eines Elektrons gemessen werden. Das Koordinatensystem sei mit zwei Schirmen verbunden, die parallel zur y-Achse stehen. Ein zur x-Achse paralleler Elektronenstrom durchlaufe einen Spalt in einem undurchsichtigen Schirm und falle dann auf einen Fluoreszenzschirm.[20] Eine Szintillation auf letzterem zeigt an, daß im Moment t ein Elektron den Spalt durchquert hat. Dadurch ist die Lage des Elektrons, bezogen auf das Koordinatensystem, in diesem Zeitpunkt bestimmt. Die Bestimmungsgenauigkeit hängt von der Breite des Spaltes ab. Wir können das Elektron nur in dem Intervall zwischen den beiden Rändern des Spaltes lokalisieren. Verengen wir den Spalt immer mehr, so steigern wir die Koordinatenmeßgenauigkeit für das Elektron unbegrenzt. Kann man bei den eben beschriebenen Erscheinungen irgendwelche Wirkung des Meßprozesses auf das Meßobjekt feststellen? Nein, falls wir das Elektron nur als Teilchen betrachten. Innerhalb der Grenzen der Spaltbreite könnte eine Veränderung der Koordinaten des Elektrons keinerlei Einwirkung auf den Schirm erzeugen, sofern es ein klassisches Teilchen wäre, also keine Welleneigenschaften hätte. Wir können den Spalt (in Gedanken) bis auf den Durchmesser des Elektrons verengen, und der Schirm würde keinerlei die Elektronenkoordinaten verändernden Einwirkungen ausüben.

In Wirklichkeit aber hat das Elektron Welleneigenschaften und erfährt daher eine Beugung. Es erhält auf Grund seiner Wellennatur einen gewissen zusätzlichen Impuls. Je enger der Spalt, um so breiter wird das Beugungsmaximum — ganz wie bei sonstigen Wellen — und um so größer die Unbestimmtheit des Impulses. Man kann dies kontrollieren, im beschriebenen Experiment freilich nur auf folgende Weise: man macht den ersten Schirm beweglich. Dann kann man aus den Verschiebungen des Schirmes die Impulsveränderung des Elektrons beim Spaltdurchgang beurteilen und mit beliebiger Genauigkeit den Impuls im Zeitmoment t des Spaltdurchlaufes messen. Doch das mit dem Schirm verbundene System ist nicht mehr völlig unbeweglich, so daß wir mit ihm die Koordinaten

[20] Vgl. W. Heisenberg, Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, Mannheim 1958, S. 19f.; E. W. Schpolski, Atomphysik, 5. Aufl., Berlin 1965, S. 399ff.

des Elektrons im Moment t nicht mehr messen können. Wir können versuchen, die Impulsbestimmtheit zu verringern, indem wir die Wechselwirkung Schirm — Elektron vermindern. Das verlangt, den Spalt zu erweitern, was wiederum bedeutet, die Genauigkeit der Impulsmessung auf Kosten der Ortsbestimmungsgenauigkeit wachsen zu lassen.

Bisher ging es um die *Koordinaten* und um den *Impuls*. Aber die Quantenmechanik sagt ebenso, daß auch eine gleichzeitige genaue Messung von Zeit t und Energie E unmöglich ist. Das Produkt $t \cdot E$ hat die Dimension einer Wirkung, es kann nicht kleiner sein als Plancks Konstante dividiert durch 2π. Diese Relation kann man nach Bohr folgendermaßen beschreiben:

$$\Delta (E' - E)\, \Delta t \geqq \frac{h}{2\pi}.$$

$\Delta (E' - E)$ bedeutet die Unbestimmtheit des Energiezuwachses, wenn E die Energie zu Beginn und E' die zu Ende des Versuches ist. Δt ist die Unbestimmtheit des Zeitmomentes, in dem die Energie gemessen wird, ein gewisser Zeitabschnitt.

Jetzt wenden wir uns dem 1927 erschienenen Artikel Heisenbergs „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik" zu, der das Unbestimmtheitsprinzip behandelt.[21] Er besteht aus vier Paragraphen. Im ersten werden Definitionen der Begriffe Ort, Bahn, Geschwindigkeit und Energie gegeben. Diese behalten in der Quantenmechanik ihre Bedeutung. Es werden die Bedingungen angegeben, unter denen diese Begriffe in der Quantenmechanik ihre Bedeutung behalten. In Paragraph zwei wird bewiesen, daß der statistische Charakter der Beziehungen in der Quantenmechanik in der charakteristischen Unschärfe der Bestimmung der klassischen Variablen bei ihrer gleichzeitigen Messung begründet ist. Paragraph drei ist der quantenmechanischen Auffassung der Makroprozesse gewidmet und der vierte der Diskussion einiger besonderer Gedankenexperimente, die die dargelegten Thesen beweisen.

Heisenberg beginnt mit der Begründung der These, die seiner Meinung nach den Ausgangspunkt der Quantenmechanik darstellt: Die Analyse beginnt mit den Begriffen Ort und Geschwindigkeit. Der vollständigen und voraussetzungsfreien gleichzeitigen Anwendung dieser Begriffe widerspricht in jedem Fall, wie sogleich ersichtlich, die Vertauschungsrelation.

Geschwindigkeit und Ort sind in der Quantenmechanik zweifelhafte Begriffe. Damit die Anwendung der Begriffe Ort und Geschwindigkeit die Vertauschungsrelation befriedigt, müssen beide Eigenschaften besitzen, die der klassischen Theorie unbekannt sind. Für die Mikrowelt ist ferner die Diskretheit bestimmter Prozesse wesentlich, darunter die Bewegung eines materiellen Punktes. In der klassischen Physik kann man von der Bewegung eines materiellen Punktes längs

[21] W. Heisenberg, Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, in: Zeitschrift für Physik, Bd. 43 (1927), S. 172—198.

der Raumpunkte sprechen, die die Bahn dieser Bewegung bilden. In der Quantentheorie sind die Verweilpunkte des Teilchens voneinander durch endliche Zwischenräume getrennt. Darum verliert die Geschwindigkeit als Ableitung des Weges nach der Zeit ihren Sinn, die Geschwindigkeit wird vielmehr durch zwei oder mehr Orte des Teilchenschwerpunktes bestimmt. Dementsprechend kann man für jede Lage a_n des Teilchens von zwei Geschwindigkeiten sprechen: eine wird durch die Orte a_{n-1} und a_n, die andere durch a_n und a_{n+1} bestimmt.

Dann betrachtet Heisenberg die Besonderheiten von Experimenten mit Quantenobjekten. An diesen sind „klassische Geräte" beteiligt, zum Beispiel solche zur Orts- und Geschwindigkeitsfeststellung. Vor allem eine solche Analyse der Quantenmechanik und Quantenkinematik hält Heisenberg für eine anschauliche Interpretation. Dabei definiert Heisenberg Anschaulichkeit in folgender Weise: „Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, daß die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält."[22] Das heißt: Die Vorstellung eines nicht mit einem Experiment verbundenen physikalischen Objektes ist nicht anschaulich. Die Anschaulichkeit, von der Heisenberg hier spricht, bedeutet Beobachtbarkeit. Es geht ihm um Experimente, an denen „klassische Geräte" teilnehmen.

Heisenberg entwirft ein anschauliches Bild eines Experimentes, das die Lage eines Teilchens bestimmt. Die Bestimmung kann mit beliebiger Genauigkeit ausgeführt werden. Beispielsweise kann in einem Gedankenexperiment mittels eines Mikroskops ein Elektron beobachtet werden. Dieses „Heisenberg-Mikroskop" wurde seitdem häufig in der quantenmechanischen Literatur angeführt. Es wurde zur Grundlage vieler analoger Gedankenexperimente. Im Prinzip unterscheidet es sich nicht von dem zuvor angeführten Gedankenexperiment mit dem Spalt und dem Fluoreszenzschirm. Bei der Bestimmung der Lage des Elektrons mittels dieses Mikroskops müssen wir das Elektron beleuchten, das heißt darauf einwirken. Je geringer die Wellenlänge der beleuchtenden Strahlung, um so höher die Energie ihrer Photonen, um so größer ihre Einwirkung auf das Elektron. Aber die Genauigkeit der Ortsbestimmung des Elektrons ist der Wellenlänge umgekehrt proportional. Man muß also möglichst energiereiches Licht verwenden.

Der Elektronenimpuls in dem Moment, da das Elektron beleuchtet wird, ist bis auf die Impulsänderung infolge der Einwirkung des „beleuchtenden" Photons bestimmt. Daher wird er um so ungenauer bestimmbar, je schärfer der Ort bestimmt wird und umgekehrt. So erhält man auch mittels dieses Gedankenexperimentes (wenigstens qualitativ) die schon bekannte Unschärferelation. Diese kann man auch darstellen, indem man den Phasenraum in Zellen mit dem Volumen h unterteilt. Dann sieht man leicht, daß der Phasenraum, wenn als Koordinaten die Raumkoordinaten und die Impulse dienen, in Zellen zerlegt werden kann, die die Dimension einer Wirkung haben. Stellen wir uns einen zweidimensionalen Phasenraum vor, der der Bewegung eines Elektrons in Richtung der x-Achse

[22] Ebenda, S. 172.

entspricht. Auf der Abszisse werden also die Koordinatenwerte, auf der Ordinate die Impulswerte p_x aufgetragen. Stellen wir uns weiter vor, innerhalb der Zellen bestehe keine Metrik, es gäbe dort nur affine Relationen. Dann kann man x nur mit einer Genauigkeit bis auf die Grundfläche Δx der Zelle h messen und den Impuls mit einer Genauigkeit bis auf die Höhe Δp der Zelle.

Die Zellen sind sozusagen elastisch, sie können unendlich deformiert werden, aber sie behalten dabei ihren Flächeninhalt h. Um den Ort des Teilchens genauer zu bestimmen, muß man die Basisfläche der Zelle verringern, dadurch aber erhöht sich ihre Höhe, denn ihre Fläche muß ja konstant bleiben. Wenn Δx nach Null geht, geht Δp nach Unendlich. Der Impuls wird völlig unbestimmt. Im Mikroskopbeispiel bedeutet das unendlich kleine Wellenlänge und unendliche Energie des Photons.

Die Zusammenfassung des ersten Paragraphen durch Heisenberg besagt: Alle klassischen Größen können für atomare Prozesse streng bestimmt werden, wenn man die charakteristischen Unbestimmtheiten zuläßt, die durch die Unbestimmtheitsrelation gegeben sind.

Im Nachtrag bei der Korrektur berichtet Heisenberg von den Ansichten Bohrs zu diesem Artikel. Bohr meinte, Heisenberg habe einige wesentliche Umstände übersehen. „Vor allem beruht die Unsicherheit in der Beobachtung nicht ausschließlich auf dem Vorkommen von Diskontinuitäten, sondern hängt direkt zusammen mit der Forderung, den verschiedenen Erfahrungen gleichzeitig gerecht zu werden, die in der Korpuskulartheorie einerseits, der Wellentheorie andererseits zum Ausdruck kommen.“[23]

Hier ist das *Komplementaritätsprinzip* gemeint. Bohr hatte es 1927 ausgesprochen und 1928 darüber einen grundlegenden Artikel veröffentlicht.[24] Später ist er dann auf dieses Prinzip in weiteren Arbeiten mehrfach zurückgekommen.

Bohr hält das Unbestimmtheitsprinzip für eine Folge des allgemeinen Komplementaritätsprinzips. Nach diesem kann man nie in *einem* Experiment sowohl korpuskulare wie Welleneigenschaften der Materie feststellen. Diese Vorstellungen legen wir mit folgendem Beispiel dar[25]: Elektronen oder Photonen gleicher Frequenz prallen auf ein Beugungsgitter, werden von ihm reflektiert und fallen dann auf einen Film. Dieser zeigt helle und dunkle Beugungsstreifen.

Nun versuchen wir experimentell, die Lokalisation der Teilchen im Moment ihrer Reflektion durch das Gitter festzustellen, also eine Korpuskeleigenschaft. Dazu müssen wir die Verschiebung der Striche des Gitters unter Einwirkung des Aufpralles eines Teilchens auf einen Strich feststellen. Dabei verwischt die Strichverschiebung das Interferenzbild.

Wir machen noch einen Versuch, um gleichzeitig Wellen- und Korpuskeleigenschaften eines Teilchens festzustellen.

Ein Teilchenstrahl durchlaufe zwei Spalten eines Schirmes und ergebe danach

[23] Ebenda, S. 197–198.

[24] N. Bohr, Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik, in: Die Naturwissenschaften, Bd. 16 (1928), S. 245–257.

[25] Vgl. W. E. Schpolski, Atomphysik, a. a. O., S. 397ff.; W. Heisenberg, Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, a. a. O., S. 59f.

beim Auftreffen auf einen Fluoreszenzschirm Interferenzstreifen, die wir beobachten können. Zugleich wollen wir beobachten, durch welchen Spalt das Teilchen (als Korpuskel aufgefaßt) fliegt. Dabei geraten wir in einen Widerspruch. Nehmen wir an, wir haben bestimmt, daß das Teilchen durch den oberen Spalt geflogen ist. Können wir sagen, wohin es im weiteren fliegen wird, wo es auf den Fluoreszenzschirm auftreffen wird? Wenn das Teilchen beim Durchgang durch den ersten Schirm lokalisiert worden ist, können wir zum Beispiel feststellen, daß es nicht durch den zweiten Spalt geflogen ist und von ihm also in seinem weiteren Weg nicht beeinflußt wird. Aber in Wirklichkeit hängt die Verteilung der Teilchenaufschläge auf dem zweiten Schirm von der geometrischen Beziehung der beiden Spalten ab. Die Bewegung jenes durch den ersten Spalt geflogenen Teilchens wird auch durch den zweiten Spalt bestimmt. So stehen wir vor der Kardinalfrage: Wenn dieses Teilchen durch Spalt I geflogen ist, was für ein physikalisches Objekt, das die folgende Lokalisation des Teilchens bestimmt, ist dann durch Spalt II geflogen? Sobald wir diese Frage nur aufwerfen, sobald wir also das Interferenzbild auf dem zweiten Schirm erklären wollen, müssen wir diese Frage und den Korpuskularaspekt überhaupt fallenlassen. Den Durchgang des Teilchens durch einen oder den anderen Spalt kann man zum Beispiel dadurch feststellen, daß das Teilchen diesen Spalt etwas verschiebt. Dadurch aber verwischt sich das Interferenzbild auf Schirm II.

Bohr vermerkt bei der Analyse derartiger Versuche, daß jedes Experiment entweder den Wellen- oder den Korpuskelcharakter des Stoffes offenbart, aber nicht beide. Daher muß man Wellen- und Korpuskeleigenschaften nicht als einander widersprechend, sondern als komplementär ansehen.

Weder Bohr noch Heisenberg haben allerdings das Komplementaritäts- und Unbestimmtheitsprinzip in den oft zu hörenden Sätzen „Störung der Phänomene durch Beobachtung“ oder „den atomaren Objekten durch Messung physikalische Attribute beilegen“ ausgedrückt. Bohr schrieb sogar, daß diese Behauptungen unrichtig sind. Das Wort „Phänomen“ bleibt einzig und allein dem Hinweis auf eindeutig mitteilbare Beobachtungsergebnisse vorbehalten.[26] Die Mikroobjekte wechselwirken mit den Makroobjekten unabhängig von der Beobachtung. Physikalische Erscheinungen sind von solcher Wechselwirkung nicht zu trennen. Darum ist das „Gerät“, von dem in der Quantenmechanik die Rede ist, etwas nicht mit irgendeiner Beobachtung Verbundenes. Es läßt wohl Beobachtungen zu, aber es existiert auch unabhängig von den Beobachtungen.

Max Born legte in einem seiner Artikel[27] das Komplementaritätsprinzip in einer sehr kurzen und klaren Form dar, die dessen objektiven Charakter einzusehen erlaubt. Ausgangspunkt ist der Widerspruch zwischen den impuls-energetischen Eigenschaften des Teilchens und seinen Welleneigenschaften: Frequenz und Wellenlänge. Zwischen beiden bestehen Beziehungen, die durch die beiden Grund-

[26] N. Bohr, Atomphysik und Philosophie — Kausalität und Komplementarität, in: Atomphysik und menschliche Erkenntnis II, Braunschweig 1966, S. 6.

[27] Vgl. M. Born, Die begriffliche Situation in der Physik, in: Physik im Wandel meiner Zeit, Braunschweig/Berlin 1958, S. 117.

formeln der Quantenmechanik ausgedrückt werden:

$$E = h\nu \quad \text{und} \quad \mathfrak{p} = h\mathfrak{k}.$$

Wie oben ausgeführt, bedeutet E die Energie, $\mathfrak{p}$ den Impuls, ν die Frequenz, $\mathfrak{k}$ die Wellenzahl der „korrespondierenden" Wellen und h das Plancksche Wirkungsquantum. Das Teilchen wird dabei als punktförmig betrachtet. Es kann raumzeitlich genau lokalisiert werden. Aber Energie und Impuls dieses punktförmigen Teilchens drücken sich durch einen Wellenvorgang aus, also durch etwas, was sich unbegrenzt in Zeit und Raum erstreckt. Wenn man den Wellenvorgang räumlich und zeitlich lokalisieren will, trifft man auf nicht zu behebende Schwierigkeiten. Das zeigt Born an einem Beispiel aus der Akustik.

Der Ausdruck „ein musikalischer Ton dauert eine bestimmte Zeit" hat keine strenge Bedeutung, denn bei der zeitlichen Fixierung kann sich die harmonische Welle in einen Satz harmonischer Wellen verschiedener Frequenzen verwandeln, das heißt in ein Geräusch, falls die Schwingungen bereits nach einiger Zeit, die die Schwingungsperiode nicht allzusehr überdauert, aufhören. Darum klingt ein Stakkato auf den tiefen Pfeifen einer Orgel so schlecht.[28] Die Lokalisation eines Wellenvorganges in Raum und Zeit beeinflußt also dessen Eigenschaften, die Energie und Impuls des Teilchens bestimmen.

Nach Bohr kann man die Grenze zwischen Objekt und klassischem Gerät innerhalb eines gewissen Spielraumes ziehen. Aber immer wird sie durch die Nichtanwendbarkeit der klassischen Begriffe auf einen Teil des Systems und Anwendbarkeit auf den anderen Teil desselben bestimmt.

„Die fundamentale Wichtigkeit der Unterscheidung zwischen Objekt und Gerät in der Quantentheorie ist, wie wir sehen, dadurch bedingt, daß bei der Interpretation aller Messungen im eigentlichen Sinne es notwendig ist, klassische Vorstellungen zu benutzen, obwohl die klassische Theorie an sich die neuen Gesetzmäßigkeiten, mit denen wir es in der Atomphysik zu tun haben, nicht erklären kann."[29]

Die *Messung* dynamischer Variablen eines quantenmechanischen Systems ist ein Spezialfall der Wechselwirkung eines Systems, das die klassischen Gesetzmäßigkeiten befolgt, mit einem System, das sie nicht befolgt. Eine solche Wechselwirkung erfolgte, generell gesprochen, unabhängig von jeglicher zielstrebigen, bewußten Tätigkeit. Es gab sie schon vor dem Aufkommen physikalischer Laboratorien, vor der Entstehung des Menschen auf der Erde und vor Entstehung dieser Erde. Bei Durchgang eines Elektrons durch einen engen Spalt hat sich immer der Impuls des Elektrons geändert. Etwas anderes ist es, daß die Veränderung des Systemzustandes infolge der Wechselwirkung mit dem Elektron, die vom Zustand des Elektrons abhängt, zur Messung der Lage und des Impulses des Elektrons benutzt werden kann und daß das mit dem Elektron wechselwirkende System als physikalisches Gerät fungieren kann.

[28] Ebenda.
[29] N. Bohr, Can Quantum — Mechanical description of Physical Reality be considered Complete? in: Physical Review, vol. 48 (1935), p. 696—702.

Eine solche Auffassung ersetzt den bedingten Begriff der Messung durch den weiteren und im allgemeinen objektiveren Begriff der Wechselwirkung, was wesentliche Bedeutung für das richtige Verständnis der Quantenmechanik hat. L. Landau und E. Lifšic unterscheiden zwischen „Quantenobjekt“ und „klassischem Objekt“.[30] Quantenobjekte sind Teilchen oder Teilchensysteme, die die Gesetze der klassischen Mechanik nicht befolgen. Klassische Objekte hingegen tun dies, beziehungsweise genauer: ihr Verhalten erlaubt eine klassische Beschreibung, also Ignorierung der Quantengesetzmäßigkeiten. Die Wechselwirkung zwischen Quantenobjekten und klassischen Objekten bestimmt den Bereich, für den die Unschärferelation gilt. Daraus resultiert die spezifische Beziehung der Quantenmechanik zur klassischen Mechanik. Die Relativitätstheorie, eine in sich logisch geschlossene Theorie, ist mit der klassischen Mechanik nur durch die Grenzfälle verbunden, für die man die Lichtgeschwindigkeit als unendlich annehmen kann. Die Quantenmechanik geht gleichfalls bei bestimmten Grenzfällen in die klassische über. Aber sie kann nicht ohne klassische Begriffe formuliert werden.[31] Diese Bemerkung ist äußerst wichtig für die Charakterisierung der logischen Struktur der Quantenmechanik und vielleicht auch für die Prognose der künftigen Theorie, die berufen ist, das zu leisten, was die 1924 bis 1927 geschaffene Quantenmechanik nicht leisten konnte. Verschärfend könnte man sogar sagen: die Quantenmechanik ist nicht so sehr Grammatik einer nichtklassischen Sprache, sondern viel eher ein Wörterbuch für die Übersetzung dieser nichtklassischen Sprache in die klassische nebst Angaben über die Genauigkeit der Übersetzung. Eine genaue „Impuls“-Übersetzung bedeutet eine Ungenauigkeit der gleichzeitigen „Koordinaten-“Übersetzung und umgekehrt. All dies rührt von der unvollständigen Anwendbarkeit der Begriffe „Impuls“ und „Koordinate“ auf das nichtklassische Objekt her.[32]

Die weitere Entwicklung der Quantenmechanik zeigt, wie sich Voraussetzungen für genauere Vorstellungen von den nichtklassischen Parametern bildeten, die zu radikaler Abkehr von den klassischen Vorstellungen führten. Die wichtigsten Voraussetzungen hierzu schuf die Synthese von Quanten- und relativistischen Konzeptionen.

8. Quanten und Relativität

Im Jahre 1927 entwickelte Dirac[33] eine *relativistische* Quantenmechanik, die die Theoreme der Relativitätstheorie berücksichtigte. Diese Theorie war in sich nicht logisch geschlossen wie die nichtrelativistische Theorie, sondern ihrem Wesen

[30] L. D. Landau/E. M. Lifschitz, Quantenmechanik, Berlin 1965, S. 3f.
[31] Ebenda.
[32] Vgl. Л. И. Мандельштам, Полное собрание трудов, т. V Москва 1950.
[33] P. A. M. Dirac, The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation, in: Proceedings of the Roy. Soc., vol. 114 (1927), p. 243–265, ders., The Quantum Theory of Dispersion, ebenda, p. 710–728; ders., The Quantum Theory of the Electron, in: Proceedings of the Royal Society, 117 (1928), Ser. A, p. 610–624; ders., vol. 118 (1928), p. 341.

nach Lösung einiger spezieller Aufgaben. Als das Wichtigste an der Diracschen Theorie erweist sich die Möglichkeit, sie zu verallgemeinern und so zu einem neuen, einheitlichen Weltbild zu kommen.

Dirac hob den nichtrelativistischen Charakter der Schrödinger-Gleichung hervor. Er überträgt die von Einstein gefundene Beziehung zwischen Energie und Impuls eines bewegten Körpers auf die Quantenmechanik. Dadurch kann man die Schrödinger-Gleichung zu einer relativistischen, gegen Übergänge von einem Inertialsystem zu einem anderen kovarianten Gleichung entwickeln. Doch dabei zerfällt die Gleichung in vier Teile, und die ψ-Funktion zerfällt ebenfalls ihrem Wesen nach in vier unterschiedliche ψ-Funktionen. Das bedeutet, vorausgesetzt eine solche Teilung hat einen physikalischen Sinn, daß der Zustand des Elektrons bei ein und denselben Werten der unabhängigen Variablen x, y, z und t der ψ-Funktion unterschiedlich sein kann.

Die Teilung in *zwei* Gleichungen und dementsprechend in zwei Zustände des Elektrons bei denselben Koordinaten und zur selben Zeit ist relativ leicht zu deuten, und zwar mit Hilfe des Elektronenspins. Dies ist eine Eigenschaft eines Teilchens, die man — allerdings mit mancherlei Abstrichen — mit der Rotation des Teilchens in der einen oder anderen Richtung vergleichen kann. Das erklärt aber nur zwei unterschiedliche Zustände des Elektrons, nicht wie gefordert, vier. Jeder Elektronenzustand mit gleichem Spin birgt nochmals zwei mögliche Zustände. Das erklärt sich dadurch, daß in der Relativitätstheorie der Ausdruck für die Energie durch deren Quadrat bestimmt wird, aus dem wir dann die Wurzel ziehen. Die Wurzel aber kann sowohl positiv als auch negativ sein.

Jeder der beiden Elektronenzustände, die sich nur durch unterschiedlichen Spin unterscheiden, kann mit positiver oder negativer Energie auftreten. Daß die relativistische Wellengleichung des Elektrons automatisch zu zwei verschiedenen inneren Zuständen des Elektrons führt, befindet sich in voller Übereinstimmung mit den längst bekannten experimentellen Daten. Die zweite Schlußfolgerung aber, die Möglichkeit negativer Energiewerte für das Elektron, stellt eine ernste Schwierigkeit dar, denn ein Teilchen mit negativer Energie widerspräche allem, was wir bisher über die Bewegung von Teilchen wissen.

Im Jahre 1930 schlug Dirac[34] folgenden Weg zur Beseitigung der negativen Energiewerte vor: Er veränderte den physikalischen Sinn der Begriffe „Zustand mit negativer Energie, der vom Teilchen eingenommen wird", und „Zustand mit negativer Energie, der vom Teilchen nicht eingenommen wird", und nannte Zustände, die vom Elektron mit negativer Energie eingenommen werden, „freie Zustände". Ein solcher Zustand ist „frei" von einem Teilchen mit negativer Energie und kann als „Loch" in der Menge der eingenommenen Zustände angesehen werden. Das Verhalten solcher „Löcher" wird dem Verhalten von Teilchen mit positiver Energie entsprechen. (Das Fehlen eines Teilchens mit negativer Energie bedeutet eine Vergrößerung der Summe der positiven Energien.) Ein „Loch" wird sich jedoch anders verhalten als ein gewöhnliches Elektron: im Feld

[34] P. A. M. Dirac, A Theory of Electrons and Protons, in: Proceedings of the Roy. Soc., vol. 126 (1930), Ser. A, p. 360—365.

einer positiven Ladung, die ein gewöhnliches Elektron anzieht, werden „Löcher" abgestoßen. Sie verhalten sich also wie positive Ladungen. Daher kommt der Gedanke, ein „Loch" sei ein Teilchen, das sich in nichts als nur in seiner Ladung vom Elektron unterscheidet. Es ist ein positives „Anti-Elektron".

Ein derartiges Teilchen erhielt den Namen Positron, und 1932 wurde es von Andersen entdeckt (unabhängig von ihm entdeckten es Blackett und Occhialini in der kosmischen Strahlung). 1933, also bereits nach dieser Entdeckung, schrieb Dirac: „Ein nicht eingenommener Zustand negativer Energie oder ein Loch, wie wir der Kürze halber sagen wollen, wird positive Energie besitzen, weil er ein Ort ist, wo ein Mangel an negativer Energie herrscht. Ein Loch gleicht in der Tat einem gewöhnlichen Teilchen, und es mit dem Positron zu identifizieren, erscheint als ein höchst vernünftiger Weg, die Schwierigkeit des Auftretens negativer Energien in unseren Gleichungen zu überwinden."[35]

Analog dazu entspricht jedem Teilchen ein Antiteilchen spiegelbildlich mit denselben Eigenschaften (Ruhemasse, Spin, Statistik), jedoch mit entgegengesetzter Ladung. So muß es in einer Antiwelt auch ein Anti-Proton geben. Dirac schreibt weiter: „Man könnte vielleicht denken, daß sich dieselbe Theorie auch auf Protonen anwenden lasse. Das würde die Existenzmöglichkeit negativ geladener Protonen erfordern, die ein Spiegelbild der gewöhnlichen, positiv geladenen böten ... Natürlich würden die negativ geladenen Protonen viel schwerer experimentell zu erzeugen sein, da sie ja, entsprechend ihrer Masse, viel mehr Energie erfordern würden.

Wenn wir uns auf den Standpunkt einer vollkommenen Symmetrie zwischen positiver und negativer elektrischer Ladung stellen, der alle Naturgesetze betrifft, müssen wir es als puren Zufall ansehen, daß die Erde (und wahrscheinlich das ganze Sonnensystem) einen Überschuß an negativen Elektronen und positiven Protonen enthält. Es ist durchaus möglich, daß bei manchen Sternen das Gegenteil der Fall ist, daß diese hauptsächlich aus Positronen und negativen Protonen zusammengesetzt sind. In der Tat könnte zu jeder der beiden Arten genau die Hälfte aller Sterne gehören. Beide Arten würden exakt die gleichen Spektren liefern, und es gäbe keine Möglichkeit, sie durch die gegenwärtigen astronomischen Methoden zu unterscheiden."[36]

Des weiteren zeigte sich, daß Elektron und Positron sich gegenseitig vernichten können, wobei sie sich in Photonen verwandeln. Umgekehrt können sich Photonen genügend großer Energie in Elektronen-Positronen-Paare umwandeln.

Mit der gegenseitigen Umwandlung von Elektronen und Positronen einerseits und Photonen andererseits sind zwei Begriffe aufgetaucht, die völlig über den Rahmen des Weltbildes hinausgehen, das sich von Galilei bis Einstein entwickelt hatte.

Der erste Begriff ist der der Transmutation, der Umwandlung der Elementarteilchen.

[35] P. A. M. Dirac, Theory of electrons and positrons, in: Nobel Lectures Physics 1922 bis 1941, Amsterdam/London/New York 1965, S. 324.
[36] Ebenda, S. 324—325.

Der zweite Begriff, der schon in Diracs relativistischer Quantenmechanik enthalten ist, ist der des Vakuumfeldes. Zu ihm kann man gelangen, wenn man kurz die zweite, auch aus dem Jahre 1927 stammende Diracsche relativistische Quantenkonzeption darlegt.

Es handelt sich um eine Theorie der Strahlung, um die Quantenelektrodynamik.[37] In der klassischen Theorie kann die elektrische Feldstärke in jedem Punkt beliebige Werte annehmen. Dirac unterwirft das elektromagnetische Feld der Quantisierung, so daß er diskrete Werte erhält. Das elektromagnetische Feld im Vakuum kann man entsprechend dem Theorem Fouriers in Komponenten zerlegen, man kann es als eine Überlagerung von monochromatischen, sinusförmigen Wellen ansehen. Nehmen wir eine dieser Komponenten des elektromagnetischen Feldes, also eine monochromatische Welle, und vergleichen sie mit einem harmonischen Oszillator! Welle und Oszillator haben ähnliche dynamische Eigenschaften. Aus den ersten Arbeiten Plancks zur Quantentheorie hatte sich ergeben, daß ein harmonischer Oszillator Energie nur in ganzen Vielfachen seiner Schwingungsfrequenz aufnehmen kann. Wenn das elektromagnetische Feld aus monochromatischen Wellen besteht, die sich wie harmonische Oszillatoren verhalten, dann ist vor allem auch die Energie des Feldes quantisiert. Sie kann diskrete Werte, die gleich $h\nu$ sind, annehmen. Das ist der Zentralgedanke von Einsteins Photonentheorie aus dem Jahre 1905. Im weiteren zeigte sich, daß die Energie eines harmonischen linearen Oszillators

$$E_n = h\nu \,(n + {}^1/_2)$$

ist.

Die kleinste für ihn mögliche Energie ist — bei $n = 0$ — offenbar

$$E_0 = h \cdot \nu/2,$$

also ungleich Null.

In Zuständen solcher kleinster, von Null verschiedener Energie hat der Oszillator eine endliche Schwingungsamplitude. Also müssen (aus Analogiegründen) auch im elektromagnetischen Feld im Zustand kleinster Energie von Null verschiedene Schwingungen vorliegen. Dieser Zustand ist durch Fehlen von Photonen im betreffenden Raumbereich gekennzeichnet: die Energie eines einzigen Photons $h\nu$ ist größer als die kleinste Energie des Feldes. Dennoch hören in diesem Zustand die Schwingungen des Feldes nicht auf. Wenn sie auch im Mittel eine Feldgröße vom Wert Null ergeben, so sind doch die mittleren *Quadrate* der Feldstärke nicht gleich Null. Denn die Werte selbst, weil etwa gleich oft positiv und negativ, heben sich, über genügend lange Zeit gemittelt, auf. Ihre Quadrate aber sind immer positiv, sie können sich daher nicht gegenseitig aufheben.

Im Mittel ist das Feld gleich Null. Aber je kleiner die Volumina sind, zu denen wir übergehen, um so merklichere Abweichungen vom Nullwert treffen wir an (Nullfluktuation des Feldes).

[37] Vgl. P. A. M. Dirac, The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation, a. a. O.

Ein elektromagnetisches Feld im üblichen Sinn besteht aus Photonen. Wo keine Photonen sind, ist auch kein Feld. Wir nennen einen Raumbereich, wo es keine Photonen gibt, ein elektromagnetisches Nullfeld oder ein *Vakuum des elektromagnetischen Feldes*. Es unterscheidet sich vom Vakuum der Atomistik, welches ein „reales Nichtsein" ist, das ein reales diskretes „Sein" umgibt, und es unterscheidet sich ebenfalls von jeglichem kontinuierlichem Medium, das in anderen Konzeptionen raumfüllend figuriert.

Vakuum ist Leere, aber nur im Durchschnitt, die einzelnen Schwankungen in ihm gehen unter, aber die Amplitudenquadrate, die immer positiv sind, sind nicht gleich Null. Das Vakuum kann *reale* Photonen erzeugen und sie auch wieder absorbieren. Bei Abwesenheit realer Photonen enthält das Vakuum virtuelle Photonen.

Die Elektronenzwillinge kann man als Quanten eines Elektronen-Positronen-Feldes auffassen. Dann bildet die Menge „nichterzeugter" virtueller Paare das Vakuum des Elektronen-Positronen-Feldes. Die Umwandlung von Elektronen-Positronen-Paaren in Photonen und umgekehrt — und überhaupt jegliche Emission und Absorption von Photonen — kann man als Wechselwirkung zwischen Elektronen-Positronen-Feld und elektromagnetischem Feld auffassen.

Wir wollen noch auf eine weitere Seite der Lehre vom Vakuum verweisen, die äußerst wichtig für die Entwicklung der allgemeinen Vorstellung vom Teilchen und von dem es umgebenden Medium ist.

In der klassischen Physik ist das Volumen eines Teilchens entweder gleich Null oder von einem bestimmten endlichen Wert. Seine Wechselwirkung mit anderen Teilchen wird durch seine Ladung und Masse bestimmt.

In dem Weltbild, das sich heute aus der Theorie der Quantenfelder formt, begegnen wir einem Teilchen, das nicht mit anderen, mit sich selbst identischen „realen" Teilchen, sondern mit virtuellen Quanten wechselwirkt. Es produziert und absorbiert diese Quanten selbst. Diese Vorstellung führt das Weltbild aus dem Rahmen der einfachen Begrenzung der klassischen Quantenobjekte hinaus. Das Teilchen wird nicht mehr unter dem Aspekt seiner Wechselwirkung mit dem klassischen Gerät betrachtet. Im Zentrum der Aufmerksamkeit steht im Gegenteil die Wechselwirkung des Teilchens mit einem physikalischen Objekt, das in klassischer Auffassung gewissermaßen nicht existiert, weshalb es auch im Unterschied zum „realen" Teilchen „virtuell" genannt wird.

Die Theorie des Vakuums ist mit der Vorstellung der Wechselwirkung des Elektrons mit dem Vakuum des Elektronen-Positronen-Feldes und dem Vakuum des elektromagnetischen Feldes verbunden. Die Berechnung dieser Wechselwirkungen führt zu einer sehr ernsten Schwierigkeit: Die Energie und also auch die Masse des Elektrons erweist sich als unendlich. Dieser Schluß ist physikalisch absurd. Ein Elektron mit unendlicher Masse könnte sich nicht bewegen. Die unendliche Energie erhält man durch Berücksichtigung des Beitrages zur Eigenenergie des Teilchens, den die virtuellen Photonen liefern, die vom Teilchen erst emittiert und dann absorbiert werden. Je kürzer die Zeit zwischen dieser Emission und der Absorption ist, um so größer ist die Energie des virtuellen Photons und sein Beitrag zur Eigenenergie des Teilchens.

Die Analyse dieser Schwierigkeit führt zu folgendem Schluß: Unendliche Energien erhält man, wenn man die Relativitätstheorie auf immer kleinere Raum- und Zeitbereiche anwendet und nicht bei einer Minimallänge und -dauer haltmacht. Es geht hier um eine Versöhnung, eine Synthese der beiden Grundideen der Physik des 20. Jahrhunderts, der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Die hier aufgewiesenen Wege führen zwar über den Rahmen der Wissenschaftsgeschichte hinaus, aber die Charakteristik dieser Wege kann als Ausgangspunkt historischer Einschätzungen dienen.

9. *Die Elementarteilchen*

Die Ende des 19. und zu Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckten Elementarteilchen haben relativ früh ihre nichtklassischen Besonderheiten demonstriert: die Verbindung von Kontinuums- und Welleneigenschaften mit korpuskularen und die Möglichkeit, sich ineinander zu verwandeln. Doch die erste Eigenschaft begrenzte nur die klassische Vorstellung vom mit sich selbst identischen Teilchen, und die zweite war nur bei genügend hohen Energien von Bedeutung. Erst Mitte der dreißiger Jahre wurden im Gefolge der systematischen Erforschung der kosmischen Strahlen Teilchen entdeckt, die weit stärker aus dem klassischen Rahmen herausfielen.[38]

Die „Entdeckung" des Elektrons im Sinne der studentischen Scherzfrage „Wie erfuhr man, daß die negative Elementarladung Elektron heißt?" ging der wirklichen Entdeckung voraus; Stoney hatte den Namen bereits vor der Entdeckung des Teilchens geprägt. Die kosmischen Strahlen erhielten den Namen dagegen erst etwa zehn Jahre nachdem man entdeckt hatte, daß die aus dem Kosmos auf die Erde fallende und die Luft ionisierende Strahlung in größeren Höhen über der Erdoberfläche intensiver wird. Schon 1900 hatte Wilson Ladungsverlust an einem Elektroskop beobachtet, den er durch eine Ionisierung der Luft infolge einer aus dem Kosmos auf die Erde fallenden Strahlung erklärte. Derartige Beobachtungen wurden vor 1910 mehrfach gemacht.

Einen überzeugenden und eindeutigen Beweis der stärkeren Ionisation in den höheren Luftschichten hatte Heß auf Grund seiner von 1911 bis 1913 durchgeführten Messungen während Ballonflügen erbracht. Damit war auch die kosmische Strahlung entdeckt, die anfänglich von Heß Höhenstrahlung genannt worden

[38] Vgl. A. M. Thorndike, Mesons — a Summary of Experimental Facts, New York/Toronto/London 1952; R. E. Marshak, Meson physics, New York/Toronto/London 1952; А. Ю. Алиханов, Тяжелые мезоны, in: Успехи физических наук, 50 (1953), S. 481—538; М. Р. Подгорецкий, мезатомы, in: Успехи физических наук, 51 (1953), S. 253—270; J. Serpe, L'évolution et l'état actuel de nos connaissances relatives aux propriétés des mesons, in: Ciel et terre 59 (1953), S. 134—156; M. A. Markow, Hyperonen und K-Mesonen, Berlin 1960; С. Ф. Пауел, Возбуждение ну-клеоны, in: Успехи физических наук 53 (1954), S. 449—454; W. Heitler, Über die gegenwärtige Theorie der Mesonen, in: Physikalische Blätter, 11 (1955) S. 359—361; А. Никольский, Пи-мезоны, in: Успехи физических наук 61 (1957), S. 343—398; Philosophische Probleme der Elementarteilchenphysik, Berlin 1965; L. de Broglie, Die Elementarteilchen, Hamburg 1949; W. Macke, Quanten und Realität, Leipzig 1963.

war. Durch Messungen von Heß und durch analoge Arbeiten Kolhörsters 1913 bis 1914 wurde die kosmische Herkunft der Strahlung und ihre Wirkung auf die Erdoberfläche bewiesen. Sie besaß, wovon man sich später auf dem Boden eines Sees überzeugte, eine ungewöhnliche Durchdringungskraft. Diese lenkte die allgemeine Aufmerksamkeit auf sie. Doch die weitere Erforschung verzögerte sich um mehrere Jahre und lebte erst nach dem ersten Weltkrieg wieder auf.

Bis 1925 führte Millikan mehrere Intensitätsmessungen an der kosmischen Strahlung mittels automatisch registrierender Geräte aus, die durch unbemannte Ballons in die oberen Schichten der Atmosphäre getragen wurden. Eine große Zahl derartiger Messungen, angestellt in etwa 15000 m Höhe, wurden mit Messungen verglichen, die auf Flugzeugen, hohen Berggipfeln und auf den Böden von Gebirgsseen gemacht worden waren. Im Jahre 1925 nannte Millikan Heß' Höhenstrahlung *kosmische Strahlung*. 1927 verwandte D. V. Skobel'cyn zur Registrierung von Höhenstrahlung eine Wilsonkammer, welche sich in einem Magnetfeld befand. So erhielt er Fotos des Bahnverlaufs der diese Strahlung bildenden Teilchen. Für die Geschichte der Atomistik war dies von wesentlicher Bedeutung — jetzt sah man fast buchstäblich verschiedene Elementarteilchen, die alle sehr hohe Energien besaßen und daher äußerst spezifische Umwandlungsprozesse und Kernreaktionen hervorriefen. Bei ihnen entdeckte man Gesetzmäßigkeiten ohne klassische Analogie.

Es gab damals schon Geiger-Müller-Zähler, die den Durchgang eines einzelnen Teilchens durch das Gerät registrierten und die Zahl derartiger Durchgänge zu zählen gestatteten. Solche Zähler wurden für das Studium der kosmischen Strahlung angewandt. In den dreißiger Jahren tauchten dann viele Kombinationen von Wilsonkammern und Geigerzählern auf. Blackett und Occhialini schufen die richtungsempfindliche Wilsonkammer, die sich automatisch einschaltet, wenn ein Teilchen durch den Zähler fliegt. In der Wilsonkammer kann man auch Teilchen fotografieren, die durch *zwei* Zähler geflogen sind, die also eine bestimmte, zum Beispiel vertikale, Richtung haben.

In den zwanziger Jahren begann man außerdem, zur Registrierung atomarer Teilchen Fotoemulsion anzuwenden. Dank dieser konnte man die Enden der Spuren, die in der Emulsion viel kürzer als in der Luft sind, genau studieren und so viel Wichtiges über die mit der Abbremsung der Teilchen zusammenhängenden Prozesse erfahren. Solch ein Spurende ist oft mit der Entstehung eines neuen Teilchens oder gar mehrerer verbunden. Beobachtungen dieser Art führen die Wissenschaft zu spezifischen Gesetzmäßigkeiten der neuen Atomistik. Es ist dies die Physik der Teilchen mit hohen Energien. Wenn ein Teilchen eine so hohe Energie hat, daß die von der Relativitätstheorie vorhergesagte Massenveränderung in ihm merklich und wesentlich wird, können wir von relativistischen Energien sprechen. Wenn die Geschwindigkeit und damit die Energie des Teilchens noch größer werden, wenn die aktuelle Teilchenmasse die Ruhemasse um ein mehrfaches übertrifft, gelangen wir in den Bereich der Annihilierungen[39] und Er-

[39] Dieser Ausdruck bedeutet in wörtlicher Übersetzung „Vernichtung". Er ist unglücklich gewählt, denn es handelt sich immer um Umwandlungen in andere Teilchen, z.B. Photonen.

zeugungen verschiedener Teilchen, in die Welt der ultrarelativistischen Effekte und Energien.

Sie zeigen auch aufs klarste die Spezifik der neuen Atomistik, die nicht mehr von der Vorstellung mit sich selbst identischer Teilchen ausgeht.

Spätere Untersuchungen der kosmischen Strahlen zeigten, daß diese aus elektrisch geladenen Partikeln bestehen. Davon zeugt vor allem die Abhängigkeit des Verhaltens der Strahlung vom magnetischen Pol der Erde. Da die Erde ein Magnet ist, dessen Pole nahe den geographischen Polen liegen, werden Teilchen, die auf Bahnen der Erde zueilen, die längs den sich in den Polen vereinigenden Kraftlinien verlaufen, nicht abgelenkt. Hingegen werden Teilchen, die sich der Erde parallel zum magnetischen Äquator nähern, durch das magnetische Feld maximal abgelenkt. Starke Ablenkung der der Erde zustrebenden Teilchen aus der oder jener Richtung vermindert ihre Intensität in besagter Richtung. Die Intensität der kosmischen Strahlung verringert sich darum mit abnehmender geographischer Breite von den Polen zum Äquator. Dieser sogenannte *Breiteneffekt* wurde durch Messungen an Orten unterschiedlicher geographischer Breite entdeckt. Dabei stellte man außerdem eine *Ost-West-Asymmetrie* der kosmischen Strahlen fest. Wie Johnson 1935 entdeckte, fällt vom Westen her am geomagnetischen Äquator und in ihm nahen Breiten mehr kosmische Strahlung ein als vom Osten her. Daraus ergeben sich für die Teilchen positive Ladungen. Dieses Resultat und die anschließenden Beobachtungen zwangen zur Annahme, daß die kosmischen Strahlen primär aus Protonen bestehen. Ihnen gesellen sich dann in der Atmosphäre andere Teilchen zu, die sich infolge der Wechselwirkung (Stöße) der Protonen mit Atomkernen der Erdatmosphäre bilden.

Durch das Studium des sogenannten *Höheneffektes*, das heißt der Intensitätsabhängigkeit der Strahlung von der Höhe über der Erdoberfläche, gewann man eine Reihe von Einsichten in die Zusammensetzung der Strahlung und die Veränderung dieser Zusammensetzung beim Durchgang durch die Atmosphäre. Allgemein fand man, daß man in der Primärstrahlung hauptsächlich Teilchen mit Energien um 10^6 eV trifft und die mittlere Energie der primären Teilchen etwa 10^{10} eV ist. Unter ihnen gibt es nicht wenige Teilchen mit Energien, die zwei bis viermal größer sind. Man findet auch noch höhere Energien. Für einige Teilchen sind Energien in der Größenordnung 10^{14} eV, also etliche hunderttausend Gigaelektronenvolt (GeV), anzunehmen.

Intensitätsmessungen hinter mehr oder minder dicken Schichten absorbierender Materie gestatteten ebenfalls, die Zusammensetzung der Strahlung zu bestimmen. Beim Durchgang durch eine 10 cm dicke Bleischicht verliert die Strahlung rasch einen Teil ihrer Intensität, doch bei weiterer Erhöhung der Schichtdicke wird der Intensitätsabfall schwächer. Daraus folgt, daß 10 cm Blei nur einen Teil der Strahlung absorbieren, und zwar die sogenannte *weiche Komponente*, aber den anderen Teil derselben (die sogenannte *harte Komponente*) fast gar nicht. Offenbar bildet sich die weiche Komponente aus der harten; daher findet sie sich trotz der Absorption in den unteren Atmosphäreschichten und sogar in großer Tiefe unter der Erde.

Die harte Komponente besteht aus Mesonen sehr hoher Energie. Außerdem findet man in ihr auch Primärteilchen, Protonen und, allerdings höchst selten, auch leichte Kerne. Die weiche Komponente besteht überwiegend aus Elektronen, Positronen und Photonen. Sie bilden sich offensichtlich beim Zerfall der Mesonen und durch deren Zusammenstöße mit Atomen.

Im Laufe der Zeit wurden neben der kosmischen Strahlung die Beschleuniger für geladene Teilchen zur Hauptquelle für Elementarteilchen mit hohen Energien. Zur Untersuchung im Gebiet der Atomkerne waren die Beschleuniger schon in den dreißiger Jahren das wichtigste Untersuchungsmittel. 1929 erhielten Cockcroft und Walton mit ihnen Protonen bis zu 380000 eV. Seit 1931 gelang es mit Hilfe von Beschleunigern, eine ganze Reihe von Kernreaktionen zu verwirklichen. Im weiteren wurden die Beschleuniger zusammen mit den kosmischen Strahlen zur experimentellen Basis für die Physik der Elementarteilchen. Theoretisch gesehen ist besonders interessant, daß beim Bau von Beschleunigern die Abhängigkeit der Teilchenmassen von den Teilchengeschwindigkeiten relevant wurde. Ein weiterer experimenteller Beweis für die relativistische Beziehung zwischen Masse und Energie bewegter Körper war damit erbracht.

Im Jahre 1931 schuf Van de Graaff seinen elektrostatischen Beschleuniger mit einem maximalen Potential von 1,5 Mio eV. (Später wurden Beschleuniger dieses Typs mit Spannungen bis zu 12 Mio eV konstruiert.) Zur gleichen Zeit bauten Sloan und Lawrence einen Linearbeschleuniger, der es ermöglichte, Protonen und Ionen mit über 1000000 eV zu erhalten. Ebenfalls 1931 bauten Lawrence und Livingston den ersten zyklischen Beschleuniger für geladene Teilchen — das Zyklotron. In diesem Gerät bewegen sich die Teilchen in einem zu ihren Geschwindigkeiten senkrechten Magnetfeld. Die Teilchenbewegung erfolgt in zwei hohlen Elektroden von der Form eines D oder einer halben flachen Dose jeweils auf einem Halbkreis, und die Teilchen werden beim Übergang von einer Elektrode zur anderen beschleunigt, so daß sich insgesamt spiralförmige Bahnen ergeben, denn die Länge der Kreisbahnstücke wächst mit der Geschwindigkeit, und die Teilchen durchlaufen während gleicher Zeitspanne steigende Distanzen. Mit dem Zyklotron ließen sich sehr schnelle Protonen und andere geladene Teilchen erhalten, so Mitte der vierziger Jahre Deuteronen mit 20 MeV und Alphateilchen mit 40 MeV. Bis 1950 waren diese Energien um ein mehrfaches gewachsen.

Bei diesen verhältnismäßig hohen Energien machte sich beim Geschwindigkeitswachstum schon die Massenvergrößerung des Teilchens gemäß der Einsteinschen Theorie bemerkbar. Die Vergrößerung der Masse führte dazu, daß ein Teilchen unter den gleichen Bedingungen die betreffende Windung der Spirale langsamer durchläuft und nicht in Resonanz mit dem energiespendenden Hochfrequenzfeld bleibt. Aus diesem Grunde gelang es nicht, mit Beschleunigern dieses Typs Teilchen noch höherer Energien zu erhalten.

Veksler beziehungsweise McMillan schlugen 1944/45 vor, das relativistische Anwachsen der Masse durch Anwachsen des magnetischen Feldes oder durch Verringerung der Frequenz des elektrischen Feldes, das den Teilchen periodisch Impulse überträgt, zu kompensieren. Man nennt diese Maßnahmen Phasenfokussierung. Ende der dreißiger Jahre wurde dann als neuer Beschleunigertyp

das Betatron vorgeschlagen, in dem Teilchen durch den Wirbel eines elektrischen Feldes beschleunigt werden. Das erste Betatron wurde 1940 durch Kerst konstruiert. Später wurde auch für die Beschleunigung von Elektronen das oben genannte Prinzip der Synchronisierung, das Wechsler und MacMillan vorgeschlagen hatten, benutzt. Bereits bei 2 MeV bewegen sich Elektronen mit 98 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Bei weiterer Erhöhung der Elektronenenergie wächst die Masse linear, die Geschwindigkeit fast gar nicht an. In den heutigen Beschleunigern vervielfacht sich die Elektronenmasse um hundert und mehr Male.

In den fünfziger Jahren wurde eine Reihe Protonenbeschleuniger mit Energien von etlichen Milliarden Elektronenvolt (GeV) geschaffen und in den sechziger Jahren Geräte von etlichen Dutzend GeV.

Die Beschleuniger ermöglichten, neue Teilchen und Antiteilchen zu entdecken, so das Antiproton und das Antineutron. Die Erzeugung eines Protonenzwillings ist in vielem der Erzeugung eines Elektronenzwillings analog. Nur ist die Masse des Protons beziehungsweise eines Antiprotons fast 2000mal größer als die des Elektrons, daher erfordert es zirka 2000mal mehr Energie, ein Proton-Antiproton-Paar zu erzeugen als ein Elektron-Positron-Paar. In der kosmischen Strahlung gibt es Teilchen mit solchen Energien, und daher entstehen in ihr auch Protonenzwillinge. Doch die Wechselwirkung dieser Strahlung mit dem irdischen Stoff verläuft so unübersichtlich, daß es schwer ist, Erscheinungen auszumachen, die mit genügender Sicherheit das Vorhandensein von Antiprotonen belegen. Diesen Mangel behoben dann die großen Beschleuniger, die Teilchen mit etlichen GeV zu erzeugen ermöglichten.

Im Jahre 1955 beobachteten Chamberlain, Segrè und ihre Mitarbeiter mit Hilfe des gerade erbauten 6 GeV-Protonenbeschleunigers in Berkeley (Kalifornien) Teilchen, die sie als Antiprotonen identifizierten. Sie hatten einen Protonenstrahl auf ein Kupfertarget[40] gerichtet, aus welchem unter dem Protonenbombardement Teilchen herausflogen. Mittels eines Magnetfeldes wurden Teilchen mit negativer Ladung von den übrigen ausgesondert. Ein besonderes Gerät filterte dann aus den negativen Teilchen diejenigen aus, die eine Geschwindigkeit von 240000 km/s hatten, das heißt, die das 12 Meter lange Gerät in $51{,}10^{-9}$ s durchliefen. Von allen negativ geladenen Teilchen konnten diese Geschwindigkeit nur Antiprotonen besitzen. Die registrierten Teilchen wurden dadurch als Antiprotonen nachgewiesen, daß man sie sich mit Protonen annihilieren ließ. Dabei entsprach die Energie der entstehenden Vernichtungsstrahlung genau der Gesamtenergie von Proton plus Antiproton.

Im Herbst 1956 berichteten Cork, Lamberton und ihre Mitarbeiter über die Entdeckung des *Antineutrons*. Die von ihnen durchgeführten Experimente verliefen schematisch wie folgt: Bei gegenseitiger Annäherung eines Protons und eines Antiprotons auf einem Abstand, wo sie sich noch nicht annihilieren, ist ein Ladungsübergang von einem Teilchen auf das andere möglich. Dadurch werden beide neutral. Wenn die positive Ladung vom Proton auf das Antiproton

[40] Target — Substanzprobe, die zwecks künstlicher Kernumwandlung Strahlen ausgesetzt wird.

übergeht, so verwandelt sich das Proton in ein Neutron und das Antiproton in ein Antineutron. Wenn ein Antiproton flüssigen Wasserstoff durchläuft, entsteht eine gewisse Zahl von Antineutronen. Man kann sie an den Szintillationen, „erkennen“, die die Annihilierungen von Antineutronen und Neutronen hervorrufen. Dabei registrierte das Gerät in genanntem Experiment nur Szintillationen, die der Energie entsprachen, die bei einer derartigen Annihilierung freigesetzt wird.

Natürlich kann man das Antineutron nicht durch seinen Ladungszustand vom Neutron unterscheiden, denn beide sind neutral. Aber diese Teilchen haben magnetische Eigenschaften, die denen einer rotierenden Ladung entsprechen. Das Neutron hat Eigenschaften einer rotierenden negativen und das Antineutron einer rotierenden positiven Ladung. Eines der wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Kernphysik erzielten im Jahre 1935 Anderson und Neddermeyer bei der Durchsicht von Fotografien der Durchgänge kosmischer Strahlung durch eine Wilsonkammer. Einige Bahnen konnten weder Protonen noch Elektronen zugeschrieben werden. Aus den Spuren war zu schließen, daß das fragliche Teilchen positiv geladen war und eine Masse hatte, die zwischen der des Elektrons und des Protons lag. Sie war etwa 200 mal größer als die Elektronenmasse. Nach der Mitteilung über das neue Teilchen begann man allerseits seine Bahnen zu fotografieren, überdies fand man solche Bahnen auch auf alten Fotos (was sehr gut die Rolle der theoretischen Apperzeption im physikalischen Experiment illustriert). Anderson und Neddermeyer nannten das neue Teilchen wegen seiner mittleren Masse „Mesotron“. Es gab noch weitere Namensvorschläge, doch hat sich seit 1947 die offiziell empfohlene, von H. J. Bhaba stammende Bezeichnung Meson durchgesetzt.

Im Jahre 1947 erhielten Powell und Occhialini während einer Hochgebirgsexpedition in Bolivien Fotografien von Nebelkammerbahnen, die einem weiteren Teilchen der kosmischen Strahlung angehörten, das eine etwas größere Masse als das Meson hatte. Es gelang, die Spuren einer Umwandlung eines dieser Teilchen in ein Meson auszumachen. Powell und Occhialini nannten ihr neuentdecktes Teilchen von 270 Elektronenmassen Pimeson (Pion) und das früher entdeckte, das sich beim Zerfall des ersteren bildet und 207 Elektronenmassen schwer ist, Mymeson (Myon).

Die Pionen entstehen durch Wechselwirkung der Primärprotonen der kosmischen Strahlung mit Protonen der irdischen Atmosphäre. Die Minimalenergie eines Protons, die für die Entstehung eines Pions beim Zusammenstoß erforderlich ist, beträgt etwa 150 MeV. Solche Energien konnten geladenen Teilchen schon Ende der vierziger Jahre künstlich vermittelt werden. Anfang 1948 erhielten Gardner und Lattès Pionen bei Bombardierung verschiedener Targets mit künstlich erzeugten Alphateilchen von 380 MeV. Es waren, den Bahnen nach zu urteilen, nicht nur positive, sondern auch negative darunter. 1950 wurde die Existenz neutraler Pionen mit Sicherheit nachgewiesen. Zu dieser Zeit wurden zur Pionengewinnung nicht nur Alphateilchen, sondern auch Protonen, Deuteronen, Neutronen und Gammaquanten benutzt.

Gehen negative Pionen oder Myonen nahe an Atomen vorbei, so können sie auf eine Bahn um den Kern eingefangen werden. Es bildet sich dann ein so-

genanntes *Mesoatom,* in dem das Meson die Rolle eines Elektrons im üblichen Atom vertritt. Mesoatome sind nur kurzlebig, denn Mesonen haben kleine Halbwertzeiten. Doch bis das Meson spontan zerfällt, befindet es sich vergleichsweise lange auf der Umlaufbahn und emittiert bei Übergang auf eine tiefere Bahn Strahlung; die Mesoatome sind denn auch durch ihre Strahlung identifiziert worden.

Mit den Mesonen ist das Studium der Kernkräfte verbunden. 1935 stellte Yukawa eine Hypothese auf, die eine Besonderheit des Kernkraftfeldes erklärte. Das Kernfeld wird analog zum elektromagnetischen Feld, das durch Photonen übertragen wird, durch eigene Quanten übertragen, durch Teilchen, die sich den Photonen gegenüber besonders durch den Besitz von Ruhemasse auszeichnen. Damit die Kräfte zwischen den Nukleonen nur innerhalb sehr kleiner Distanzen wirken, müssen die die Wechselwirkung übertragenden Teilchen eine gewisse Ruhemasse besitzen. Als man die Myonen entdeckt hatte, glaubte man zuerst, daß diese die „schweren Elektronen" Yukawas wären. Tatsächlich stellte man fest, daß Myonen mit Kernen schwach wechselwirken. Doch erst nach der Entdeckung des Pions (1947) wurde klar, daß Yukawa gerade Teilchen dieses Typs vorhergesagt hatte.

Die Entwicklung der Theorie der Kernfelder hatte bereits vor der Entdeckung des Pions begonnen, doch wurde sie durch diese Entdeckung sehr beschleunigt. Allerdings führte die Mesonentheorie der Kernkräfte zu keiner Möglichkeit, Bindungsenergien von Kernen auszurechnen, nicht einmal bei den einfachsten. Dies liegt an einem ganz allgemeinen Mangel der Methoden der heutigen Quantentheorie. Unter diesen ist vor allem die sogenannte *Methode der Störungstheorie* zu nennen. Bei der Wechselwirkung von Elektronen, zwischen denen elektrische Felder wirken, betrachtet man zunächst den einfachsten Fall — die Wechselwirkung eines gegebenen Elektrons mit dem elektromagnetischen Feld, die allein von der Ladung des Elektrons abhängt. In der Rechnung tritt dabei eine dimensionslose Konstante für die Kopplung zwischen dem elektromagnetischen Feld und dem des Elektrons auf. Ihr Wert ist $1/137$; sie wird Feinstrukturkonstante genannt. Danach berücksichtigt man die komplizierten Umstände, die das erste Approximationsergebnis etwas modifizieren, das Wechselwirkungsschema „stören". Sie hängen vom Quadrat oben genannter Konstante vom Bruch $1/137^2$, also einer ganz kleinen Größe ab. Bei noch anspruchsvolleren Bedingungen werden auch noch die „Störungen" berücksichtigt, die von $1/137^3$ und danach von noch höheren Potenzen dieses Bruches abhängen. Aber alle die folgenden Korrekturen sind sehr klein in bezug auf die erste Approximation, weil die Koppelungskonstante viel kleiner als eins ist.

Bestimmt man analog zum elektromagnetischen Feld die Koppelungskonstante von Nukleon und Mesonenfeld, so erhält man für diese Werte von mehreren Einheiten. In diesem Falle kann man die Störungstheorie nicht anwenden, denn die höheren Korrekturglieder wären größer als die vorangegangenen, so daß sich das quantitative Bild der Nukleonen-Wechselwirkung mit jeder weiteren Annäherung grundlegend ändern würde. Daß die Kopplungskonstante der Kernkräfte viel größer ist als die Feinstrukturkonstante, rührt daher, daß die starke Wechselwirkung die elektromagnetische um ein vielfaches übertrifft.

Die Schwierigkeiten der Mesonentheorie überschatten die gesamte heutige Physik. Mögen diese Schatten auch von einer neuen physikalischen Konzeption weiterhin aufgehellt werden, so reichen diese Aufhellungen doch nicht aus, um Details in der grundlegend veränderten Landschaft feststellen zu können. Denn die Wechselwirkungen der Nukleonen und einiger anderer Elementarteilchen können nicht im Rahmen des Bildes bewegter, mit sich selbst identischer Teilchen beschrieben werden. Die Kleinheit der Kopplungskonstante des elektromagnetischen Feldes zeigt an, wie weit man mit ihr beim Studium der elektromagnetischen Wechselwirkung vorankommt, ohne auf Teilchenumwandlungen (Photonen in Elektronenzwillinge und umgekehrt) zu stoßen. Die Größe der Konstanten starker Wechselwirkungen zeigt dagegen, daß man im Gebiet der Kernkräfte von Anfang an analoge Teilchenumwandlung antrifft. Die Masse der geladenen Pionen beträgt 272 Elektronenmassen, das sind 139 MeV, die Masse der neutralen Pionen 263 Elektronenmassen, gleich 136 MeV. Wenn ein Kernnukleon ein Pion aussendet, so kann dieses dank der Unschärferelation für Energie und Zeit eine gewisse Zeit lang mit genannter Energie existieren. Es geht dabei um virtuelle Pionen. Aus ihren Massenwerten ergibt sich unter Benutzung der Unschärferelation ihre Lebensdauer zu $5 \cdot 10^{-24}$ s. Die Strecke, die ein Pion in dieser Zeit zurücklegt, kann, da es sich nicht schneller als das Licht zu bewegen vermag, höchstens $5 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^{10}$ cm $= 1{,}5 \cdot 10^{-13}$ cm betragen. Ungefähr soweit reichen auch die Kernkräfte.

So stellt sich die Wechselwirkung von Nukleonen als eine von jedem Nukleon emittierte Wolke aus virtuellen Pionen dar, welche innerhalb kürzester Zeit wieder absorbiert wird und daher die Wechselwirkungen nur auf kurze Entfernung überträgt. Wenn der Abstand zweier Nukleonen geringer ist als diese Reichweite, dann verbindet sie — vereinfacht ausgedrückt — der Übergang eines Pions. Handelt es sich um zwei Protonen oder zwei Neutronen, so wird ihre wechselseitige Anziehung durch die Emission eines neutralen Pions durch das eine Proton (Neutron) und die Absorption des Pions durch das andere hervorgerufen. Die Kernwechselwirkung zwischen Proton und Neutron geschieht durch geladene Pionen: ein negatives wandert vom Neutron zum Proton und ein positives vom Proton zum Neutron.

In den Kernen der meisten Elemente gibt es mehr Neutronen als Protonen, demzufolge sind die meisten Massenzahlen größer als das Doppelte der entsprechenden Kernladungszahlen. Die Stabilität der Isotopen fordert einen „Überschuß" an Neutronen, das heißt mehr Neutronen als Protonen, um die elektrostatischen Abstoßungskräfte zwischen den Protonen zu kompensieren, die ja alle gleiche Ladung besitzen. Diese elektrostatischen Kräfte wirken im Gegensatz zu den Kernkräften nicht nur auf die Nachbarnukleonen, sondern wegen ihrer unbeschränkten Reichweite innerhalb des gesamten Kernvolumens. Daher wächst die Energie der elektrischen Abstoßung mit Vergrößerung der Kernladung sehr schnell, schneller als die Energie der Kernkräfte bei Vergrößerung der Massenzahl, nämlich proportional dem Quadrat der Protonenzahl, dividiert durch den Kernradius. Dieser ist proportional der Kubikwurzel aus der Zahl *aller* Nukleonen. Die elektrostatische Abstoßungsenergie wächst, wie hieraus ersichtlich, ungleich

schneller als die Zahl der Protonen, so daß für schwere Kerne die Abstoßung zum Teil durch zusätzliche Kernkräfte, das heißt eine Anzahl von Neutronen, kompensiert werden muß, die die Anzahl der Protonen übertrifft. Im Kalziumkern gibt es tatsächlich noch gleich viele Protonen wie Neutronen, nämlich je zwanzig. Beim stabilen Wismutkern kommen, weil er mehr Protonen hat, auf 83 Protonen bereits 127 Neutronen. Dabei wächst die elektrostatische Abstoßungsenergie um mehr als das Zehnfache, so daß Kerne mit großer Protonenzahl nur bei einem ausreichend großen Neutronenüberschuß stabil sind. Aber schließlich vermindert die elektrostatische Abstoßung bei weiterem Wachstum der Massenzahl trotz Steigerung der Neutronenzahl die Kernbindungsenergie ganz wesentlich.

Was erklärt die Existenz der Atomkerne, vor allem ihre Kompaktheit? Es sind die spezifischen Kernkräfte, die die gegenseitige Abstoßung der gleiche Ladung tragenden Protonen im Gleichgewicht halten. Der Übergang zur Kernphysik enthält daher — verursacht durch die Entdeckung neuer Elementarteilchen mit neuen Eigenschaften — ein Abrücken vom elektromagnetischen Weltbild. Dabei bedeutet „neue Eigenschaften" erstens, daß jedes Teilchen neuen Typs nicht nur bloß Eigenschaften besitzt, welche die schon bekannten Teilchen nicht haben. Solch ein Teilchen zeigt vielmehr Eigenschaften, die uns zwingen, die Prinzipien der Atomistik als Ganzes zu überprüfen, denn diese neuentdeckten Eigenschaften sind der klassischen Atomistik ganz fremd und auf diese oder jene Weise mit dem Kontinuumsaspekt verbunden. Beim Übergang von der Atom- zur Kernphysik führten die neuen Teilchen die Mesonen als die Quanten der Kernkraftfelder und die Neutronen sogleich zu einem Kernmodell, das nicht in den Rahmen der elektromagnetischen Konzeption paßte.

Eins der bedeutungsvollsten Ergebnisse der Atomistik war die Auffindung neuer Mesonen mit Massen von etwa 1000 Elektronenmassen. Sie erhielten die Bezeichnung K-Mesonen. Sie unterscheiden sich voneinander durch das Ladungsvorzeichen: es gibt positive, negative und neutrale K-Mesonen. Ihre Halbwertzeiten liegen zwischen 10^{-8} und 10^{-10} s. Die gleichen K-Mesonen können auf verschiedene Arten zerfallen, sie können sich etwa in zwei oder drei Pionen, in Myonen und Elektronen verwandeln. Das geladene K-Meson wiegt etwa 965, das neutrale etwa 960 Elektronenmassen. Die unterschiedlichen Zerfallstypen für K-Mesonen gleicher Masse sind ein für die heutige Atomistik sehr charakteristischer Umstand. Das Weltbild, von dem sie ausgeht, ist nicht nur durch die ihm momentan angehörenden Eigenschaften geprägt, sondern auch durch das ihm bevorstehende Schicksal.

Die Geschichte der Entdeckung der K-Mesonen begann 1944, als Leprince-Ringuet und Lhéretier in der kosmischen Strahlung ein neues Teilchen entdeckten, dessen Masse in der Nähe der des Nukleons lag. Bald entdeckte man neue Typen von Umwandlungen für Teilchen mit gleicher Masse. 1947 lenkten Rochester und Butler bei der Untersuchung verschiedener Teilchenspuren in der Wilsonkammer die Aufmerksamkeit auf Spurenverzweigungen, die dem Buchstaben V ähnelten. Zwei Zweige einer solchen Spur gehörten, ihrem Aussehen nach zu urteilen, einem geladenen Teilchen mit einer Masse von 1000 Elektronenmassen und einem Pion an. Man kam zu dem Schluß, daß jenes Teilchen das Pion emittiert

hatte; außerdem zeigte das fotografische Bild des Zerfalls, daß sich außer dem geladenen Pion offenbar noch ein neutrales Pion gebildet hatte, das aber, weil es keinen Ionisationseffekt hervorrufen konnte, auf der Platte nicht festgehalten war. Eine von Rochester und Butler untersuchte zweite Spur gab zu der Vermutung Anlaß, daß ein Teilchen, zwischen 700 und 1200 Elektronenmassen schwer, aber weil neutral, ohne sichtbare Spur, beim Zerfall ein positives und ein negatives Meson gebildet hatte, wodurch eine V-förmige Spur entstanden war.

Für die Entwicklung der Atomistik war die Entdeckung äußerst wichtig, daß solche Teilchen, obwohl von gleicher Masse und Ladung, doch unterschiedliche Zerfallstypen haben. Seit 1953 standen K-Mesonen nicht nur in der kosmischen Strahlung, sondern auch aus dem Kernbeschuß mit Protonen von zwei und mehr GeV zur Verfügung.

Gegenwärtig kennt man vier Arten von K-Mesonen: eine positiv geladene, eine negativ geladene und zwei neutrale, die — ein ganz neues Identifikationskriterium — mittels ihrer *unterschiedlichen Zerfallstypen* charakterisiert werden. Man hat anzunehmen, daß K-Mesonen in irgendeinem Maße Kernkräfte übertragen und somit die Funktion ausüben, die gewöhnlich den Pionen zugeschrieben wird. Dann muß man den Radius der Kernkräfte kleiner ansetzen, als es die Hypothese tut, nach der Pionen das Feld der Kernkräfte bilden.

Die Beobachtungen V-förmiger Spuren, die zur Entdeckung der K-Mesonen geführt hatten, bewiesen außerdem die Existenz von Hyperonen, das sind Teilchen mit einer Masse, die größer als die des Nukleons ist. Auf den genannten Fotografien Rochesters und Butlers waren Bahnen zu sehen, die man als Zerfall eines neutralen Teilchens in ein Proton und ein negatives Pion deuten konnte. Die Masse jenes neutralen Teilchens mußte mehr als 2000 Elektronenmassen betragen. Später fand man dann positive und negative Teilchen mit noch größerer Masse.

In allen Fällen, wo sich ein Hyperon bildet, entsteht gleichzeitig ein anderes Teilchen, meist ein K-Meson. Diese Regel für die gemeinsame Entstehung wurde 1953 von Gell-Man und unabhängig von ihm von Nishidsima ausgesprochen; der damit ein bestimmtes Erhaltungsgesetz verband. Die *einzelne* Entstehung eines Hyperons oder K-Mesons wäre eine Verletzung dieses Gesetzes. Um eine solche Verletzung zu vermeiden, führten die beiden Forscher eine neue, die Teilchen charakterisierende Quantenzahl ein, die sogenannte *Seltsamkeit* (Strangeness). Diese wird bei der gleichzeitigen Erzeugung eines Hyperons und eines K-Mesons erhalten. Jedem Hyperon, Nukleon und Meson wird eine bestimmte Seltsamkeitszahl zugeschrieben. Sie ist Null bei Pionen und Nukleonen, -1 bei einer Art K-Mesonen und Hyperonen, $+1$ bei einer anderen und -2 bei einer dritten. Teilchen mit einer von Null verschiedenen Seltsamkeitszahl — also K-Mesonen und Hyperonen — heißen seltsame Teilchen. Bei starken Wechselwirkungen, welche 10^{-22} s und noch kürzer dauern, bleibt die Seltsamkeit erhalten. Die Summe der Seltsamkeiten der Ausgangsteilchen ist gleich der Summe der Seltsamkeiten der resultierenden Teilchen. Bei schwachen Wechselwirkungen, etwa beim Zerfall von K-Mesonen, deren Zerfallzeit mit 10^{-8} bis 10^{-10} s beträchtlich länger ist, bleibt die Seltsamkeit *nicht* erhalten. Aus dem Erhaltungssatz

für die Seltsamkeit und den den Nukleonen, Hyperonen und Mesonen zugeschriebenen Seltsamkeitszahlen folgt, daß bei Wechselwirkung eines Teilchens mit einem anderen mit der Seltsamkeit Null immer Paare gebildet werden müssen. Aber diese Lösung des Rätsels der gemeinsamen Erzeugung und die Einführung einer neuen phänomenologischen Charakteristik für die Teilchen warfen die Frage nach dem physikalischen Sinn der Seltsamkeit auf.

Aus der Analyse des Zerfalls der K-Mesonen ergab sich noch eine weitere fundamentale Entdeckung. Bekanntlich verändert sich die Wellenfunktion im allgemeinen, wenn man von einem räumlichen Koordinatensystem zu einem anderen übergeht. Aber verändert sie sich auch, wenn man nur die Richtungen der Koordinatenachsen vertauscht, das heißt die Vorzeichen der Koordinatenwerte? Verändert sich also die Wellenfunktion, wenn man zum Beispiel von einem Rechtsschrauben-Koordinatensystem zu einem Linksschrauben-Koordinatensystem (einer Spiegelung des ersten) übergeht? Bekanntlich nennt man ein Rechtsschrauben-Koordinatensystem ein solches, in dem der Übergang von der x-Achse zur y-Achse im Uhrzeigersinn erfolgt, wenn man in Richtung der positiven x-Achse blickt. Vorzeichenwechsel der drei Koordinaten führt zum Linksschraubensystem. Dieselbe Veränderung geschieht auch bei Spiegelung eines Rechtsschraubensystems.

Verändert sich die Wellenfunktion beim Übergang vom Rechtsschrauben- zum Linksschraubensystem? Die Antwort hierauf hängt vom Charakter der Wellenfunktion ab. Beispielsweise ändert sich das Quadrat der Koordinaten nicht, wenn man das Vorzeichen vertauscht. Generell ändern gerade Potenzen oder Produkte mit einer geraden Anzahl von Faktoren nicht das Vorzeichen, wohl aber Potenzen mit ungeradem Exponenten und Produkte aus einer ungeraden Zahl von Faktoren. Darum sagt man, wenn sich bei Übergang von einem Rechts- zu einem Linksschraubensystem die Wellenfunktion *nicht* ändert, daß sie gerade ist, beziehungsweise daß sie *positive Parität* hat. Wenn die Wellenfunktion bei Spiegelung ihr Vorzeichen ändert, ist sie ungerade, sie hat *negative Parität*. Je nach dem Charakter der ihnen zugehörigen Wellenfunktionen schreibt man den Teilchen selbst auch positive oder negative Parität zu. Ende der vierziger Jahre meinte man, daß die Wellenfunktion bei Teilchenumwandlungen ihre Parität *immer* erhält; besonders beim Zerfall und bei Bildung von Teilchen. Aber das Verhalten der K-Mesonen widerspricht der Paritätserhaltung. Für ein K-Meson gibt es mehrere Zerfallsmöglichkeiten. Es kann zum Beispiel zwei oder drei Pionen bilden. Die Wellenfunktion von drei Pionen kann man als Produkt ihrer einzelnen Wellenfunktionen ansehen, die bei Pionen negative Parität haben. Also hat auch das Produkt aus den drei Wellenfunktionen negative Parität. Wenn aber das K-Meson in nur zwei Pionen zerfällt, dann hat das Produkt der Wellenfunktionen der beiden Pionen positive Parität. Die Parität der Wellenfunktion der aus dem K-Meson gebildeten Teilchengesamtheit ist also in einem Falle negativ, im anderen positiv. Bei positiver Wellenfunktion ändert sich im Gegensatz zu einer negativen das Verhalten des Teilchens nicht, wenn es im Spiegel betrachtet wird.

Ein Teilchen mit Spin kann man mit einer Schraube vergleichen, die sich bei Rotation längs ihrer Rotationsachse vorwärts bewegt. Der Spin entspricht hierbei

der Gewindedrehung: sie verläuft im Uhrzeigersinn, wenn der Spin dieselbe Richtung wie der Impulsvektor hat. Dem Impuls entspricht eine Bewegung der Schraube längs der Achse.

Nun zurück zu den beiden Zerfallsmöglichkeiten des K-Mesons! Der K-Mesonen-Zerfall ist durch schwache Wechselwirkung bedingt, so wie der Beta-Zerfall von Kernen, wobei aus dem Kern Elektronen und Antineutrinos beziehungsweise beim positiven Beta-Zerfall Positronen und Neutrinos herausfliegen.

Anfang 1956 äußerten Li und Yang die Annahme, daß bei allen schwachen Wechselwirkungen die Parität nicht erhalten bleibt. Später, als diese Annahme experimentell bestätigt worden war, ergab sich die Aufgabe, die Nichterhaltung physikalisch zu interpretieren. Man erinnerte sich an Teilchen, welche die Eigenschaften einer Schraube haben können, das heißt, in der sich die eine Drehrichtung von der anderen in bezug auf die Vorwärtsbewegung unterscheidet, kurz, die Spiralcharakter besitzen. 1929 schrieb Weyl, daß ein nichtgeladenes Teilchen mit Nullmasse zwei entgegengesetzte Spinrichtungen haben kann. Wie wir sahen, kann man die Existenz solcher Teilchen durch die Nichterhaltung der Parität bei schwachen Wechselwirkungen erklären. Diese Erklärung wurde 1956 fast gleichzeitig von Li und Yang, Landau und 1957 von Salomon gegeben.

Ebenfalls 1957 wurde durch Ledermann, Garwin und Weinrich die Nichterhaltung der Parität beim Zerfall von Myonen und durch Telegdi und Friedman von Myonen und Pionen experimentell bestätigt. Dabei zerfallen die Pionen in Myonen und Antineutrinos. Der Spin der Pionen ist Null, der der Myonen und Antineutrinos $^1/_2$. Letztere haben eine bestimmte Spinorientierung, einen bestimmten Spiralcharakter längs ihrer fortschreitenden Bewegung. Wenn die Myonen ebenfalls in bezug auf ihren Impuls einen orientierten Spin haben, dann dürften die durch ihren Zerfall entstandenen Elektronen keine bevorzugte Richtung besitzen. Nur dieses Resultat entspräche der Erhaltung der Parität. Aber jene Elektronen *haben* eine bevorzugte Richtung und folglich einen gewissen Spiralcharakter. Dies zeigt, daß auch die Myonen bei ihrer Bildung Spiralcharakter haben.

Nun gilt es zu klären, welche *allgemeinen* Ideen die Theorie der Mesonen und der Kernkräfte der Physik der Elementarteilchen gebracht haben und wie sie auf das Leitproblem der Atomistik eingewirkt haben. Hierzu muß einiges über die heutigen Ansichten von den Elementarteilchen und Feldern ausgeführt werden, um danach einige Resultate der Entwicklung der nichtklassischen Atomistik und sodann der Atomistik überhaupt zu formulieren.[41]

[41] Vgl. zum folgenden: W. Pauli, Meson theory of nuclear forces, 2. ed., New-York/London 1948; А. А. Власов, Теория многих частиц, Москва—Ленинград 1950; теория элементарных частиц, опыты с частицами и квантами большой энергии, Москва 1950; Nuclear physics, a course given by E. Fermi, Chicago 1955; М. А. Марков, О систематике элементарных частиц, Москва 1955; B. Rossi, High-Energy particles, New York 1952; J. D. Jackson, The physics of elementary particles, Princeton 1958; C. F. Powell/P. H. Fowler/D. H. Perkins, The study of elementary particles by the photographic method. An account of the principal techniques and discoveries illustrated by an atlas of photomicographs, London 1959; A. A. Sokolow, Elementarteilchen, Berlin 1965; J. W. Nowoshilow, Elementarteilchen, Leipzig 1962; Нелинейная квантовая

In den sechziger Jahren erlebte die Physik eine eigentümliche Rückkehr zur Idee des einheitlichen Feldes. Man bemüht sich freilich nicht wie Weyl, Einstein und andere Wissenschaftler in den zwanziger Jahren, das Problem auf eine Geometrisierung des elektromagnetischen Feldes zu reduzieren. Heutzutage muß die einheitliche Feldtheorie das Wissen über mehrere Dutzend unterschiedlicher Teilchentypen, eine ganze Hierarchie von Feldern und deren Wechselwirkungen verallgemeinern.

Wir müssen zum näheren Verständnis kurz das über diese Teilchen und Felder Gesagte wiederholen und vervollständigen.

Jedem Elementarteilchen läßt sich ein Wellenfeld zuordnen, das durch eine koordinaten- und zeitabhängige Wellenfunktion beschrieben wird. Die Abhängigkeit der Wellenfunktion von den Koordinaten x, y, z und der Zeit t wird durch eine Wellengleichung bestimmt. Die wichtigsten Eigenschaften einer Wellengleichung — in ihr unterscheiden sie sich auch untereinander — ist ihr tensorieller Rang. Er charakterisiert die Größe, welche der Wellengleichung gehorcht. Eine

теория поля, Москва 1959; P. Roman, Theory of elementary particles, 2. ed., Amsterdam 1961; А. К. Вальтер, Введение в физику элементарных частиц, Харков 1960; Физика элементарных и космических лучей, современ. достижения, Москва 1960; Я. А. Смородинский, Элементарные Частицы, Москва 1962; W. O. Lock, Fizyka jadrowa wysokich energii, Warschau 1963; A. M. Shapiro, Table of Properties of the "Elementary" Particles, in: Revs. Mod. Phys. vol. 28, 1956, S. 164—170; N. Hanson, On elementary particle theory, Philos.-Sci., 23, 1956, S. 164—170; Я. Б. Зельдович, Развитие теории античастиц, заряды элементарных частиц и свойства тяжелых нейтральных мезонов, in: Успехи физических наук, 59 (1956), S. 377—398; C. N. Yang, Present Knowledge about the new Particles, in: Revs. Mod. Phys. 29 (1957), S. 231—235; M. Гелл-ман/Е. Розенбаум, Элементарные Частицы, in: Успехи физических наук, 64 (1958), S. 391—416; Д. Д. Иваненько, Развитие физики элементарных частиц, in: Вопросы философии, 1958, Nr. 5, S. 74—87; P. E. Hodgson, Elementary particles: the present situation, in: Sci. News. 1959, Nr. 52, S. 95—111; Б. Л. Иоффе/Л. Б. Окунь, Исследование элементарных частиц, in: Вестник А. Н. СССР, 1959, Nr. 7, S. 17—26; Л. Б. Окунь, Странные частицы (распады), in: Успехи физических наук, 68 (1959), b. 3, S. 83ff.; Л. Ван Гофф, Прогресс в нашем понимании элементарных частиц, in: Успехи физических наук, 84, b. 2, S. 355—362; А. Бальдин/А. Комар, Основные направления исследования в физике элементарных частиц (XII Международная конференция по физике высоких энергии), in: Успехи физических наук, 85, т. 3, S. 543—564; О теоретических аспектах физики элементарных частиц (Diskussion in Genf, 1962), in: ЯФН, 56, т. 2, S. 303—314; Я. Зельдович, Классификация элементарных частиц и кварки „в положении для пешеходов", in: Успехи физических наук, 56, т. 2, S. 303—314; W. Heisenberg, Vorträge über kosmische Strahlung, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953; V. F. Weisskopf, Роль исследования элементарных частущ в развитии современной физики, in: Успехи физических наук, 84, т. 2, S. 343—354; C. N. Yang, Elementary particles. A short history of some discoveries in atomic physics, Princeton N. J. 1961; К. И. Щелькин, Физика микромира, Москва 1963; Я. Смородинский, Спектры элементарных частиц, in: Природа-Nr. 2, 1965, S. 2—14; Б. Берестецкий, Динамическая симметрия элементарных частиц, in: Успехи физич. наук, 85, S. 493; Я. Смородинский, Унитарная симметрия, in: Успехи физич. наук, 83, т. 4; E. P. Wigner, Symmetriegesetze in der Quantentheorie, in: Physikalische Blätter, 20 (1964), 9; G. F. Chew/M. Gell-Man/ A. H. Rosenfeld, Strongly Interacting Particles, in: Scientific American, 210, 74 (1964); E. Marshak/E. C. Sudarshan, Introduction to elementary particle physics, New-York/London 1961; F. Lurçat, Réflexions sur les particules élémentaires, in: „Pensée" 1961, Nr. 98, S. 68—96.

Welle auf einer Wasseroberfläche stellt die Schwingung eines Niveaus dar, das heißt einer physikalischen Größe, die durch eine Zahl ausgedrückt wird und die sich beim Übergang zu einem anderen Koordinatensystem nicht ändert. Das gleiche gilt für Temperaturschwingungen. Eine derartige Größe heißt Skalar. Unter den Feldern, die der Bewegung von Teilchen, den Quanten dieses Feldes, zugeordnet sind, treffen wir auch skalare Felder an, in denen sich die Wellenfunktion weder bei Parallelverschiebung des Koordinatensystems noch bei Drehung, noch bei Lorentztransformationen und auch nicht bei Inversionen — Spiegelungen — ändert.

Doch existieren auch Felder mit anderem tensoriellen Rang. Das elektromagnetische Feld ist zum Beispiel durch ein Vektorpotential, einen vierdimensionalen Vektor charakterisiert, der sich bei Transformationen des vierdimensionalen Koordinatensystems genau so ändert wie die Koordinatenachsen. Es gibt sodann Wellenfelder, deren Wellenfunktion in der vierdimensionalen Raumzeit nicht wie der Vektor vier, sondern nur zwei Komponenten hat. Letztere Größe heißt Spinor. Sie steht als Tensor halber Stufe zwischen Skalar und Vektor, dem Tensor erster Stufe.

Ein Feld kann schließlich durch eine Größe charakterisiert sein, die sich bei Verschiebung und Drehung des Koordinatensystems als Tensor zweiter Stufe verändert. Solche Felder heißen Tensorfelder.

Felder werden auch durch das Verhalten der sie beschreibenden Größen bei Inversion charakterisiert, das heißt bei Vorzeichenvertauschung der Koordinatenachsen, also bei Spiegelungen. Einen Skalar, der bei einer Spiegelung sein Vorzeichen ändert, nennt man Pseudoskalar, einen Vektor, der sein Vorzeichen ändert, Pseudovektor. Und ein Tensor wird entsprechend zum Pseudotensor. In Abhängigkeit vom Verhalten der physikalischen Größe bei Inversion, also von den Transformationseigenschaften der Wellengleichung bei Spiegelung, spricht man von skalaren und pseudoskalaren, vektoriellen und pseudovektoriellen Feldern usw. Aus den Transformationseigenschaften der Wellenfunktionen, den fundamentalen kontinuierlich-wellenhaften Eigenschaften der Elementarteilchen, ergeben sich die korpuskularen Eigenschaften des Spins und der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Statistik. Die anderen korpuskularen Eigenschaften — Masse und Ladung des Teilchens — aus irgendwelchen Beziehungen abzuleiten ist bis jetzt noch nicht gelungen. Man muß sie der Erfahrung entnehmen.

Der Spin legt eindeutig die Transformationseigenschaften der Wellenfunktion des Teilchens fest. Unter dem Spin versteht man bekanntlich einen gewissen Drehimpuls des Teilchens, den man früher — vor Dirac — in anschaulicher Weise mit einer Rotation des Elektrons verband. Heute jedoch assoziiert man kein solches anschauliches Modell. Einem Teilchen mit dem Spin Null wird ein skalares oder pseudoskalares Feld zugeordnet. Einem Teilchen mit einem Spin, der gleich dem elementaren Wirkungsquantum h, dividiert durch 2π ist, teilt man ein Vektor- oder Pseudovektorfeld zu. $h/2\pi$ nimmt man als Einheit des Spins. Die Teilchen eines Spinfeldes haben einen Spin, der gleich der Hälfte dieser Einheit ist.

Mit dem Spin eines Teilchens verbunden ist die Statistik, die ein Ensemble aus Teilchen der betreffenden Art befolgt. Eine dritte korpuskulare Eigenschaft

eines Teilchens ist mit den Transformationseigenschaften seiner Wellenfunktion bei räumlicher und zeitlicher Inversion verknüpft. Wenn bei Inversion der Koordinatenachsen die Wellenfunktion ihr Vorzeichen ändert (ähnlich wie bei einer ungeraden Potenz irgendeiner Größe), dann hat das Teilchen die sogenannte Parität -1, wenn sie sich nicht ändert, die Parität $+1$. Von der Parität eines Teilchen*systems* zu sprechen hat nur Sinn, wenn es isoliert ist oder sich in einem zentralsymmetrischen Feld befindet. Wellenfunktionen nennt man skalar, vektoriell und tensoriell, wenn sich bei Inversion der Koordinaten das Vorzeichen *nicht* ändert; wenn es sich ändert, heißen sie pseudoskalar, pseudovektoriell oder pseudotensoriell. Somit ergibt sich: Kennt man den Spin, so kennt man den Rang des Tensors, kennt man die Parität, so weiß man, ob es sich um einen Tensor oder Pseudotensor gegebenen Ranges handelt. Angabe von Spin und Parität bestimmt vollständig den tensoriellen Rang der Wellenfunktion.

Komplizierteren Charakters sind die zwischen 1930 und 1950 entstandenen Begriffe, die schon genannte „Seltsamkeit“ (strangeness), der Isotopenspin, die Barionen- und Leptonenladung.

Zunächst haben wir eine Klassifizierung der bisher bekannten Elementarteilchen nach Spin und Parität zu geben. Ergänzt wird die Tabelle der Teilchen durch die einstweilen nur empirisch gewinnbaren Werte für Masse und Ladung. Wir werden, von den konkreten Teilchentypen ausgehend, ihre gegenseitigen Umwandlungen und daraus den Sinn der neuen Eigenschaften formulieren.

Ordnet man die Elementarteilchen nach ansteigender Ruhemasse, so steht auf dem ersten Platz mit Ruhemasse 0 und einem Spin von 1 das Photon.

Darauf folgt die Gruppe der Leptonen, Teilchen mit Spin 1/2. Es sind Neutrino, Elektron und Myon nebst ihren Antiteilchen. Die Ruhemasse von Neutrino und Antineutrino ist Null, die des Elektrons, gewöhnlich als nukleare Masseneinheit genommen, $9{,}106 \cdot 10^{-28}$ g, die des Myons 207mal so groß.

Die folgende Gruppe, die der Mesonen, umfaßt Teilchen, die 264- bis 974mal so schwer sind wie das Elektron. Zu ihr gehören die positiven, negativen und neutralen π-Mesonen (Pionen) und die K-Mesonen und deren Antiteilchen. Die Spins der Teilchen dieser Gruppe sind Null.

Die vierte Gruppe bilden die Baryonen. Sie enthält das Nukleon (Proton und Neutron mit 1836 und 1839 Elektronenmassen) und die Hyperonen mit die Nukleonenmasse übertreffenden Massen sowie die entsprechenden Antiteilchen.

In der folgenden Tabelle sind Masse, Spin und Halbwertzeit von etwa 30 Teilchen angegeben, gegliedert nach oben genannten vier Gruppen, denen das Photon vorangestellt ist. Die Daten dieser Tabelle unterliegen laufenden Korrekturen. Solchen Korrekturen sind auch fundamentalere Eigenschaften ausgesetzt. Es ist zum Beispiel noch durchaus nicht klar, welche der angeführten Teilchen wirklich elementar sind. Schließlich ist noch ungelöst, was denn die Elementarteilchen sind, worin das Kriterium für Elementarität besteht.

Die Schwierigkeit der Definition von „Elementarität“ hängt in bestimmter Hinsicht mit der klassischen Vorstellung von sich erhaltenden Elementen, die im Verlauf der Zeit nur ihre räumliche Position und damit die Struktur ihrer Gruppierungen ändern, zusammen. Die Atomistik des 20. Jahrhunderts kennt

Tabelle der Elementarteilchen (Stand 1966)

	Name	Symbol	Masse	Spin	Halbwertzeit (sek)
I	Photon	γ	0	1	stabil
II	Neutrino	ν	0	$^1/_2$	stabil
	Antineutrino	$\bar{\nu}$	0	$^1/_2$	stabil
	Elektron	e^-	1	$^1/_2$	stabil
	Positron	e^+	1	$^1/_2$	stabil
	Myon, neg.	μ^-	207	$^1/_2$	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
	Myon, pos.	μ^+	207	$^1/_2$	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
III	Pion, neutral	π°	264	0	$1{,}8 \cdot 10^{-16}$
	Pion, neg.	π^-	273	0	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
	Pion, pos.	π^+	273	0	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
	K-Meson, pos.	K^+	967	0	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$
	K-Meson, neg.	K^-	967	0	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$
	K-Meson, neutral	K°	967	0	10^{-10}
	Anti-K-Meson, neutral	$\overline{K^\circ}$	974	0	$0{,}6 \cdot 10^{-7}$
IV	Proton	p	1836	$^1/_2$	stabil
	Antiproton	$\bar{p}$	1836	$^1/_2$	stabil
	Neutron	n	1839	$^1/_2$	10^3
	Antineutron	$\bar{n}$	1839	$^1/_2$	10^3
	Lambda-Hyperon	λ	2183	$^1/_2$	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Anti-Lambda-Hyperon	$\bar{\lambda}$	2183	$^1/_2$	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Sigma-Hyperon, pos.	Σ^+	2328	$^1/_2$	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$
	Anti-Sigma-Hyperon, pos.	$\overline{\Sigma^+}$	2328	$^1/_2$	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$
	Sigma-Hyperon, neutral	Σ°	2332	$^1/_2$	10^{-14}
	Anti-Sigma-Hyperon, neutral	$\overline{\Sigma^\circ}$	2332	$^1/_2$	10^{-14}
	Sigma-Hyperon, neg.	Σ^-	2341	$^1/_2$	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$
	Anti-Sigma Hyperon, neg.	$\overline{\Sigma^-}$	2341	$^1/_2$	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$
	Ksi-Hyperon, neutral	Ξ°	2566	$^1/_2$	$1{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Anti-Ksi-Hyperon, neutral	$\overline{\Xi^\circ}$	2566	$^1/_2$	$1{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Ksi-Hyperon, neg.	Ξ^-	2580	$^1/_2$	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$
	Anti-Ksi-Hyperon, neg.	$\overline{\Xi}$	2580	$^1/_2$	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$
	Omega-Hyperon, neg.	Ω	3300	$^3/_2$	$0{,}7 \cdot 10^{-10}$

jedoch Wechselwirkungen von Teilchen, die nicht zu Umgruppierungen letzterer im Raum führen, sondern zu Transmutationen. Darum ist es erforderlich, hier einiges über die Typen der Wechselwirkungen zwischen Teilchen und über die Eigenschaften von Teilchen zu sagen, die sich nicht nur in Koordinatenveränderungen äußern, sondern auch in der Art des Zerfalles der Teilchen. Hiermit verbunden sind Besonderheiten der Teilchen, die in extrem kleinen Raumzeitgebieten bei starken Wechselwirkungen auftreten.

Man unterteilt die Wechselwirkungen der Teilchen in folgende: starke, elektromagnetische, schwache und gravitationelle. Die Intensität jener Wechselwirkun-

gen wird durch die jeweiligen Wechselwirkungskonstanten gemessen, die proportional den Quadraten der Teilchenladungen sind.

Zu den starken Wechselwirkungen gehören die zwischen Nukleonen und Pionen. Die Intensität dieser Wechselwirkungen wird durch die Mesonenladung g oder die dimensionslose Konstante g^2/hc gemessen. Sie liegt in der Größenordnung von 10.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist die Wechselwirkung aller elektrisch geladenen Teilchen (Elektronen, Protonen usw.) mit dem elektrischen Feld (mit den Photonen). Die Intensität dieser Wechselwirkung ist beträchtlich kleiner als bei den starken Wechselwirkungen. Die entsprechende Kopplungskonstante, die sogenannte Feinstrukturkonstante e^2/hc, ist etwa 1/137.

Von den schwachen Wechselwirkungen nennen wir die zwischen den Nukleonen und den aus einem Elektron und einem Neutrino bestehenden Paaren beim β-Zerfall. Sie fällt mit der Kopplungskonstante anderer schwacher Wechselwirkungen zusammen, zum Beispiel bei der Wechselwirkung, die den Zerfall von K-Mesonen und Hyperonen in Pionen verursacht.

Die Gravitationswechselwirkung kann man zu den genannten drei anderen Wechselwirkungen rechnen, wenn man annimmt, daß sie durch entsprechende Quanten, die Gravitronen, bewerkstelligt wird, die von *allen* Teilchen ausgestrahlt und absorbiert werden. Die Bindung der Teilchen (und entsprechend der Felder, deren Quanten sie sind) mit den Gravitronen (mit dem Gravitationsfeld) ist, selbst mit der schwachen Wechselwirkung verglichen, sehr gering. Ihre dimensionslose Konstante liegt in der Größenordnung von 10^{-38}. Es ist eine ultraschwache Wechselwirkung.

Mit der Wechselwirkungsintensität ist in einer Reihe von Fällen die Zerfallsgeschwindigkeit und damit die Lebensdauer der Teilchen verbunden. Die starke Wechselwirkung der Nukleonen mit Pionen findet man bei der Wechselwirkung der Nukleonen in den Kernen, die Pionen aussenden, und bei der Bildung von Hyperonen mit K-Mesonen beim Zusammenstoß von Nukleonen und Pionen. Diese Prozesse verlaufen in Zeiten von etwa 10^{-23} s. Elektromagnetische Wechselwirkungen verlaufen in Zeiten von 10^{-15} bis 10^{-17} s. Die schwachen Wechselwirkungen von Nukleonen und Leptonen beim β-Zerfall dauern ungleich länger. Es gibt eine Wechselwirkung, die für die Erklärung der inneren Eigenschaften der Teilchen besonders wichtig ist, das heißt für ihre Masse, Ladung und ihre eigentlich „neuen" Eigenschaften. Das Typische an letzteren ist, daß sie nicht in der vierdimensionalen Raumzeit, sondern in abstrakten Räumen von der Art des Isospinraumes geometrisch ausgedrückt werden. Dies ist die uns schon bekannte Wechselwirkung eines Teilchens mit den von ihnen ausgestrahlten (virtuellen) Feldern (Selbstwechselwirkung). Die Quanten solcher Felder, die von den emittierenden Teilchen absorbiert werden, führen nicht zur Beschleunigung anderer Teilchen, wirken nicht dynamisch auf andere Teilchen. Sie führen daher auch nicht zu einer Krümmung von Weltlinien, das heißt prinzipiell geometrisierbaren Veränderungen des Verhaltens der Teilchen. Solche Quanten sind entweder dynamisch überhaupt nicht feststellbar oder erst bei höheren Graden der Annäherung. Man nennt sie virtuelle Quanten. Diese können auch dann emittiert werden, wenn die Energie des Teilchens kleiner ist als die Energie der Ausstrah-

lung. Beispielsweise kann ein Elektron ein virtuelles Photon aussenden, dessen Energie die Gesamtenergie des Elektrons um ein Vielfaches übertrifft. Denn die Energie ist durch die Unbestimmtheitsrelation mit der Zeit so verbunden, daß der Energieausbruch, multipliziert mit der Unbestimmtheit der Zeit, gleich dem Wirkungsquantum ist.

Bei der folgenden Absorption des Photons kehrt die Energie zurück, und so wird die makroskopische Energiebilanz des Elektrons und seiner Strahlung nicht verletzt. Stellen wir uns vor, daß ein Kassierer einer Kreditanstalt eine Geldsumme entnimmt, die das Erlaubte überschreitet, mit der Verpflichtung, sie *vor* der Revision zurückzugeben, und daß Revisionen für größere Summen häufiger und für kleinere Summen seltener stattfinden. Dann könnte er für eine sehr kurze Leihfrist eine Summe entnehmen, die die erlaubte Summe um ein Vielfaches übersteigt. Eine solche Analogie erlaubt, die virtuellen Prozesse „Energieausleihe" zu nennen; sie erfolgen, energetisch gesehen, „auf Kredit".

Die virtuellen Prozesse führen zu Veränderungen der Elektronenmasse und -ladung. Diese Veränderungen können, wie wir sehen werden, nicht ohne paradoxe Resultate in die bestehende Theorie eingeordnet werden, denn sie geben die schon im vorangegangenen Kapitel erwähnten endlichen Werte der Elektronenenergie. Und doch kann man mit den virtuellen Prozessen, wenn man nur mit irgendwie begrenzten Energien arbeitet, einige beobachtbare Effekte erklären.

Die Tendenzen, die in Richtung einer auf virtuellen Prozessen basierenden künftigen Theorie weisen, können nur durch ganz allgemeine Schemata illustriert werden, die keinerlei Eindeutigkeit beanspruchen. Mit etwas mehr Sicherheit kann man die historischen und logischen Bindungen dieser Tendenzen an gegenwärtig bestehende Theorien suchen. Dabei ist es manchmal erforderlich, Sinn, logische Struktur und historische Bedeutung der bestehenden Theorien umzuwerten. Als Beispiel hierfür diene die Relativitätstheorie. Sie schien eine Gesamtheit von Behauptungen über das Verhalten räumlicher, zeitlicher und raumzeitlicher Intervalle in verschiedenen Bezugssystemen zu sein. Heute sehen wir, daß den relativistischen Beziehungen zwischen Masse und Energie Prozesse entsprechen, die weder die Lagen noch die Geschwindigkeiten, noch die Beschleunigung der Körper, noch die Körperkräfte ändern, sondern lediglich innere Effekte im Sinne von Veränderungen innerer Eigenschaften der Elementarteilchen, ihrer Masse und ihrer Ladung, ausüben. Die virtuellen Prozesse der Ausstrahlung und Absorption von Photonen verschiedener Energien nennt man die „Selbstwechselwirkung" des Elektrons. Aber diese überschreitet den Rahmen der relativistischen Dynamik, in der man die Beziehungen eines Teilchens zu einem anderen und die gegenseitige Einwirkung aufeinander betrachtet. Es war Ende der vierziger Jahre eine der wichtigsten Aufgaben der Elektrodynamik, die virtuellen Effekte, die dynamische Effekte ergeben, von den virtuellen Effekten abzugrenzen, die zu Massen- und Ladungsveränderungen des Elektrons führen. Die Existenz relativistischer Effekte nichtdynamischen Charakters — die ultrarelativistischen Effekte — zwingt, die Sätze der Relativitätstheorie selbst in dynamische und über das Dynamische hinausgehende zu unterteilen. So verändert sich in der

Rückschau im Zusammenhang mit der Untersuchung und Abgrenzung virtueller Prozesse die Einschätzung der logischen Struktur der Relativitätstheorie.

Sie verändert sich, weil sich die Frontlinie der physikalischen Forschungen in sehr kleine räumlich-zeitliche Bereiche verlagert hat, wo nicht mehr jedem Punkte bestimmte Koordinaten zugeschrieben werden können, wo solche fundamentale Begriffe wie der des Bezugssystems und des kontinuierlichen starren Körpers ihren unmittelbaren Sinn vielleicht verlieren. Die starken Wechselwirkungen, die sich in Bereichen von 10^{-13} cm und in Zeitspannen von 10^{-24} s abspielen, stellen die Individualisierung eines Teilchens in Frage, das an solcher Wechselwirkung teilnimmt.

Das hat zu Versuchen geführt, die Tabelle der Teilchen zu ordnen. Auf der Suche nach der Ordnung, die die große Zahl von Elementarteilchen auf eine kleine Zahl wirklich elementarer fundamentaler Typen reduziert, sind viele Hypothesen aufgestellt worden, unter denen hier die der Quarks erwähnt sei. Dieses Wort ist aus Joyces Roman „Finnegans Wake“ entnommen und bezeichnet dort undefinierbare phantastische Wesen. Mit diesem Ausdruck werden hypothetische Teilchen mit ebenfalls phantastischen Eigenschaften benannt. 1964 schlugen Gell-Man und gleichzeitig Zweig vor, daß man alle Teilchen mit starker Wechselwirkung aus drei Quarks gebildet annehmen solle. Die Quarks haben sehr große Masse und wechselwirken bei der Bildung von Elementarteilchen extrem stark. Dadurch wird sehr viel Energie abgegeben — der Massendefekt ist sehr groß —, und folglich sind die Massen der gebildeten Teilchen beträchtlich kleiner als die Summe der einzelnen Quarkmassen. Den Quarks werden Bruchteile der elektrischen Elementarladung als Ladung zugeschrieben, entweder ein oder zwei Drittel. Es gibt auch andere Versuche, die gegenwärtig bekannten Teilchen aus einer kleinen Zahl von hypothetischen Fundamentalteilchentypen zusammenzusetzen. Eindeutige Resultate, die eine bestimmte Ordnung der Elementarteilchentabelle garantieren, haben diese Vorschläge aber noch nicht ergeben.

Es ist noch eine Klasse von Teilchen oder Quasiteilchen entdeckt worden, die wahrscheinlich den Begriff des Elementarteilchens noch radikaler verändern werden als die Entdeckung der Hyperonen und K-Mesonen. Jedenfalls hat besagte neue Klasse von Teilchen die Unbestimmtheit des Begriffes Elementarteilchen, die zuvor schon recht groß war, noch mehr vergrößert.

Es geht um die sogenannten Resonanzen.[42] Ihre Halbwertzeiten betragen 10^{-22} bis 10^{-23} s. In gewissem Sinne sind dies kritische Zeitspannen: denn in 10^{-23} s durchläuft das Licht eine Distanz von etwa 10^{-13} cm. Das entspricht etwa dem klassischen Elektronenradius, der Wirkungssphäre der Kernkräfte, einem Minimum für viele Beziehungen. Diese Länge erhielt den Status einer Einheit und die Bezeichnung „Fermi“.

Zur Entdeckung der Resonanzen kam es beim Studium der Wechselwirkungen zwischen Mesonen und Nukleonen, deren *Streuquerschnitte* man seit 1950 systematisch untersuchte. Der Terminus Streuquerschnitt bedeutet eine nennenswerte

[42] В. Гришин, Резонанцные взаимодействия элементарных частиц, in: Успехи физич. наук, 86, В. 1, S. 71—124; Г. Б. Жданов, Частицы высокой энергии, Москва 1965, S. 128—142.

Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Bewegungsrichtung eines Teilchens bei seinem Vorbeiflug an dem in Rede stehenden Teilchen geändert wird. Ein Zusammenstoßen makroskopischer Kugeln, die die Richtungen ihrer Bewegungen ändern, ist um so wahrscheinlicher, je größer die Kugelquerschnitte sind. Diese Analogie aus dem Makroskopischen rechtfertigt den Ausdruck „Querschnitt" auch dort, wo es um die Streuung von Teilchen und um deren Wahrscheinlichkeit geht. Schon 1952 untersuchte Fermi mit seinen Mitarbeitern in Chikago den Streuquerschnitt von Pionen, die in einem Zyklotron unterschiedliche Energien erhalten hatten und auf Protonen geschossen wurden. Der Querschnitt änderte sich in Abhängigkeit von der Summe der Ruhemassen und der kinetischen Energie der Teilchen. Eine solche Summe nennt man „effektive Masse" der wechselwirkenden Teilchen, im genannten Fall also des Pion-Proton-Systems. Sie wird in Energieeinheiten, und zwar Elektronenvolt, ausgedrückt. Trug man in einem Diagramm in der Waagerechten die effektive Masse auf und in der Senkrechten den Streuquerschnitt, so ergab sich ein scharfes Maximum, eine plötzliche Streuquerschnittsvergrößerung bei einer effektiven Masse von 1238 MeV. Als man später stärkere Beschleuniger anwenden und Pionen höherer kinetischer Energie erzeugen konnte, wurden weitere derartige steile Maxima in jenem Diagramm entdeckt. Diese Maxima erhielten den Namen Resonanzen, und die zugehörigen Energien nannte man auf Grund einer sehr einfachen Analogie Resonanzenergien. Da die Energie eines bewegten Teilchens proportional der Frequenz der Schwingungen seiner Wellenfunktion ist, können wir, wenn wir von der Korpuskel- zur Wellenvorstellung übergehen, den Ausdruck „definierte Energie" durch „definierte Frequenz" ersetzen. In akustischen oder elektromagnetischen Erscheinungen ist beispielsweise die bestimmte Frequenz einer Resonanz für ein gegebenes System durch die Vergrößerung der Amplitude gekennzeichnet. Bei der Streuung von Pionen an Nukleonen beobachtet man die starke Vergrößerung des Streuquerschnittes bei bestimmten Energien, denen bestimmte Frequenzen entsprechen. Aus Analogiegründen wurden diese Energien Resonanzen genannt.

Vielleicht zeugt eine Resonanz als Maximum des Wechselwirkungsquerschnittes von einem Bruch in der Selbstidentität, von der Umwandlung des Pions und Nukleons in ein intermediäres instabiles Teilchen, aus dem danach sogleich erneut ein Pion und ein Nukleon entstehen. Mit anderen Worten: Ein Resonanzzustand des Pion-Proton-Systems muß vielleicht als instabiles Teilchen neuen Typs betrachtet werden, das sich sowohl vom Pion als auch vom Proton unterscheidet.

Es bestehen einige Gründe dafür, dies zu vermuten. Wir können beim Pion und Proton nicht die Erhaltung ihrer Individualität garantieren, wenn sich das System im Resonanzzustand befindet. Dafür können wir einem derartigen Zustand die charakteristischen Eigenschaften eines Teilchens zuschreiben, und zwar Eigenschaften, die für einen ganz bestimmten Teilchentyp charakteristisch sind.

Aus der Resonanzenergie kann man auf die Masse des intermediären Teilchens schließen. Man hat letztere durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit zu teilen, um die Masse zu erhalten. Die Halbwertzeit ergibt sich aus der Breite des Maximums der effektiven Masse im Diagramm. Gewöhnlich nimmt man als Maß für

diese Breite die Breite in halber Höhe des Maximums. Diese Größe, ein Intervall zwischen zwei Energiewerten, ist mit der Halbwertzeit durch die Unschärferelation verknüpft: Die Unbestimmtheit der Energie, das heißt das Intervall zwischen den bestimmten Größen, ist reziprok proportional der zeitlichen Unbestimmtheit, das heißt dem Intervall zwischen den bestimmten Momenten, die man als Entstehungs- und Zerfallsmoment des Resonanzteilchens auffassen kann. Nach dieser Methode kam man für Resonanzen zu den erwähnten Halbwertzeiten um 10^{-23} s.

In den sechziger Jahren ist die Zahl der Resonanzen mit bestimmten Massen, Lebensdauern, Spins und anderen Quanteneigenschaften angestiegen. Resonanzen entstehen nicht nur bei Pionen-Nukleonen-Streuung, sondern auch bei anderen starken Wechselwirkungen. Die Zahl der bekannten Resonanzen übersteigt bereits die Zahl der sonstigen Elementarteilchen und beträgt gegenwärtig etwa zweihundert.

In der Geschichte der neuesten Atomistik ist die Entdeckung der Resonanzen deshalb so interessant, weil sich in ihr ganz offensichtlich die neue Auffassung des Begriffes „elementar" zeigt. Dabei sei unterstrichen, daß nicht von einem Sinnverlust dieses Ausdruckes die Rede sein kann, sondern von einem neuen Sinn. Ist es möglich, einem Teilchen elementaren Charakter zuzuschreiben, das ein System aus zwei oder mehr Teilchen darstellt, wie etwa das System aus Pion und Nukleon?

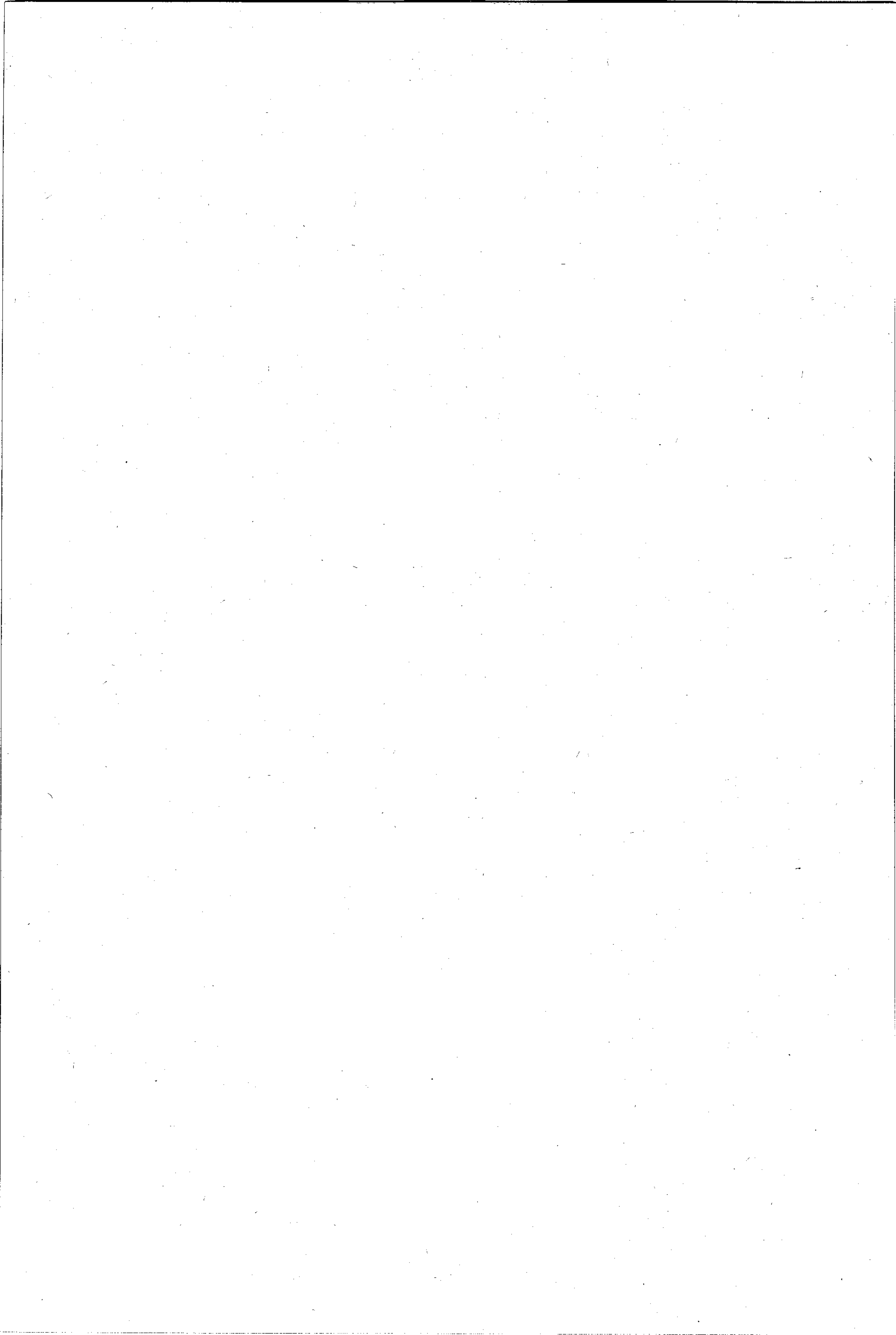
Man kann das unzweifelhaft, wenn die Vereinigung dieser Teilchen nicht in Form räumlicher Annäherung erfolgt und sich nicht auf eine solche reduziert, das heißt nicht Resultat der aristotelischen *φορά*[43] ist, sondern eine substantielle Änderung durch die *φορά* und *γένηδις*, das heißt eine Transmutation. Der Zerfall eines solchen Teilchens ist kein räumliches Auseinanderfallen präexistenter Teile. Auch nimmt an jenen qualitativen Veränderungen das Medium der Umgebung teil, vielleicht ist es sogar eine sehr ausgedehnte Umwelt.

Äußerst radikale Schlüsse ergeben sich in dieser Richtung aus der sogenannten Schnürsenkel-(bootstrap)-Idee. So nannten Chew und Frautschi die Vorstellung, daß ein Teilchen als Ergebnis seiner Wechselwirkung *existiert*.[44] Aus dieser Idee folgen nicht nur radikale rein physikalische, sondern auch physikgeschichtliche Schlüsse über die Weiterentwicklung der Elementarteilchentheorie. (Freilich ist die bootstrap Idee vom Rang einer eindeutigen physikalischen Idee noch weit entfernt.) Sie besagt nun das Folgende: Ein stark wechselwirkendes Teilchen ist eine dynamische Struktur, vergleichbar einem Punkt sich kreuzender Kräfte. In denselben Kräften drückt sich auch die starke Wechselwirkung des Teilchens aus. Bootstrap ist eine entschieden nichtlineare Vorstellung: Das Teilchen ist in seiner Existenz an die Wechselwirkung mit anderen Teilchen gebunden, und die Existenz dieser Teilchen und ihrer Wechselwirkungen ist wiederum „von Gnaden" des erstgenannten Teilchens.

[43] Vgl. Aristoteles zu *φορά*: Phys. B I, 192b, 13ff.

[44] Vgl. G. F. Chew/S. C. Frautschi, Potential Scattering as Opposed to Scattering Associated with Independent Particles in the S-Matrix Theory of Strong Interactions, in: Physical Review Vol. 124 (1961), S. 264–268.

Die Bootstrap-Hypothese verspricht der Physik sehr viel; wenn die starken Wechselwirkungen als nichtlineare Selbstwechselwirkungen bestimmt werden können, dann sind die für diese Wechselwirkungsform charakteristischen Symmetrien und Erhaltungssätze nicht weiterhin Konstanten, die ad hoc gesetzt sind, um diese oder jene Erscheinung zu erklären. Sie könnten vielmehr das besitzen, was Einstein „innere Vollkommenheit" genannt hat. Es bestünde dann die Aussicht, sie aus der Übereinstimmung des Teilchensystems und seiner Wechselwirkungen ableiten zu können. Für den Physikhistoriker gibt die Konzeption von Chew und Frautschi weniger bestimmte Resultate, aber sie gibt sie und verspricht sie nicht nur. Gleich, ob diese Konzeption bestätigt werden wird oder nicht, sie illustriert unzweifelhaft eine reale Tendenz in der Physikentwicklung der Mitte unseres Jahrhunderts.



X. DIE KLASSISCHE PHYSIK IN DER SICHT DER RELATIVISTISCHEN QUANTENKONZEPTIONEN

1. Der diskrete Charakter der Raumzeit auf dem Lichtkegel und der Epilog der klassischen Physik

Eine Analyse der Tendenzen der theoretischen Physik seit 1950 erlaubt, die Grundideen der Physik seit dem 17. Jahrhundert neu zu bewerten und einen durchgehenden Leitgedanken aufzufinden, der sich — beginnend mit Galileis „Dialog" — bis zu den neuesten relativistischen Quantenkonzeptionen wohl modifiziert hat, aber zugleich bleibendes Subjekt der geschichtlichen Veränderungen ist. Die Suche nach einem historisch invarianten Inhalt in den sich einander ablösenden physikalischen Ideen ist die erste Aufgabe der Wissenschaftsgeschichte. Der Begriff der Evolution verlöre seinen Sinn, wenn nicht nachgewiesen würde, *was* sich eigentlich entwickelt.

Welches ist nun die positive physikalische Idee, die verschiedene Formen annimmt, sich verallgemeinert und präzisiert und doch dabei mit sich selbst identisch bleibt, ein historisch Invariantes umschließend, so daß sich die einander ablösenden physikalischen Theorien in einen wirklichen historischen Prozeß verwandeln?

Zur Antwort auf die gestellte Frage bedürfen wir einer Analyse der heutigen Tendenzen der theoretischen Physik und einer Umbewertung der Vergangenheit aus der Sicht dieser Tendenzen.

Unter der Vielzahl neuer physikalischer Konzeptionen, die die unendlichen Werte für Energie und Masse zu eliminieren versuchen, gibt es eine, die eine kleinste Länge und ein kürzestes Zeitintervall postuliert. Wenn man nicht mehr die Aussendung eines virtuellen Photons in einem Abstand annehmen darf, der kleiner ist als jene Minimallänge ϱ und nicht kürzer dauert als $\tau = \varrho/c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit des Photons ist, dann entfallen bei der Berechnung der Eigenenergie des Elektrons jene Glieder mit unendlich hoher Energie, die die Beiträge der in unbegrenzt kurzer Zeit und unbegrenzt kleinen Raumgebieten verlaufenden Emissionen und Absorptionen dieser virtuellen Photonen liefern. Als Verallgemeinerung dieser Konzeption erscheint die Hypothese eines diskontinuierlichen Raumes und einer ebenfalls diskontinuierlichen Zeit.

Die Idee der Diskretheit von Raum und Zeit ist sehr alt, man trifft sie in allen Etappen der Physikentwicklung, aber seit etwa dreißig Jahren tritt sie in ständig neuen Formen auf. Gewöhnlich wird die kleinste Länge in der Größenordnung von 10^{-13} cm angenommen und die kleinste Zeitdauer dementsprechend als ϱ/c mit 10^{-24} s. Doch diese Idee wurde nicht zur Grundlage der neuen Physik, weil sie

erstens der relativistischen Kausalität in ultramikroskopischen Bereichen widerspricht und zweitens ohne Zusatzannahmen im Makroskopischen nicht zu dieser relativistischen Kausalität führt. Gerade der zweite Grund ist das Haupthindernis für den Aufbau eines neuen Weltbildes, das von einer kleinsten Länge und einer kürzesten Dauer ausgeht. Wenn sich aus der diskreten Raumzeit als Annäherungen im Makroskopischen die Beziehungen der Relativitätstheorie ergeben würden, könnten wir von einem neuen System der Naturerklärung sprechen.

Die Forderung der relativistischen Kausalität besteht darin, daß ein Ereignis A' im Weltpunkt x', dessen Ursache Ereignis A im Weltpunkt x ist, durch ein zeitartiges vierdimensionales Intervall getrennt sein muß, das heißt, A' darf nicht auftreten, bevor nicht die Zeit vergangen ist, die das Licht braucht, um von x nach x' zu gelangen. Die relativistische Kausalität umfaßt Prozesse, die mit Geschwindigkeiten verlaufen, die die des Lichtes nicht übersteigen. Wenn der Raum diskret ist, so ist ein Elementarwürfel ϱ^3 ein absolut starrer Körper. In ihm würde ein Impuls mit unendlicher Geschwindigkeit weitergeleitet werden. Zu einem analogen Resultat führen auch andere Versuche, die Diskretheit des Raumes physikalisch zu interpretieren. Immer ergibt sich, daß dieser Raum nicht lorentzinvariant ist, also der Relativitätstheorie widerspricht.

Gehen wir zuerst von den Kriterien der „äußeren Bewährung“ und der „inneren Vollkommenheit“ aus! Die Theorie des diskreten Raumes stimmt mit zwei fundamentalen Fakten überein: mit der endlichen Eigenenergie und der Wechselwirkung eines Teilchens mit dem Vakuum; mit den analogen Wechselwirkungen, welche ohne Zusatzhypothesen zu unendlich großen Werten der Energie führen. Die Diskretheit des Raumes erlaubt gleichzeitig, die Fakten widerspruchsfrei zu erklären. Aber die „äußere Bewährung“ fordert Übereinstimmung dieser Hypothese im Makroskopischen mit der relativistischen Kausalität.

In bezug auf die „innere Vollkommenheit“ steht es um die Hypothese des diskreten Raumes verwickelter. Sie ist keine Ad-hoc-Annahme, ist in der Wissenschaftsgeschichte immer wieder aufgetreten, war in den verschiedenen Epochen mit unterschiedlichen Fakten und Verallgemeinerungen verknüpft. Aber ist diese Hypothese eine physikalische?

Vergleichen wir die Idee der Raumdiskontinuität mit der der Nichteuklidizität. Beide entstehen ganz ungezwungen. Der kontinuierliche euklidische Raum wird durch das Archimedische Axiom (daß der Raum unbeschränkt teilbar ist) und das Postulat Euklids bestimmt. Verzicht auf das eine oder das andere führt zur nichtarchimedischen Geometrie einerseits oder zur nichteuklidischen andererseits. Die logische Widerspruchsfreiheit der nichteuklidischen Geometrie verschaffte ihr aber noch nicht den Charakter einer *physikalischen Annahme*. Eine solche wurde sie erst, als Einstein in der allgemeinen Relativitätstheorie zeigte, daß man das Gravitationsfeld als eine Abweichung von der euklidischen Geometrie betrachten kann. Hierin und in der prinzipiellen Möglichkeit einer experimentellen Prüfung besteht der physikalische Gehalt der nichteuklidischen Geometrie.

Die nichtarchimedische Geometrie, die die Existenz minimaler Abstände und nur ganzzahliger Vielfacher derselben postuliert, bleibt eine rein geometrische

und für die Physik apriorische Annahme ohne Hinweis auf eine konkrete physikalische Interpretation des Überganges von der diskreten Geometrie zur kontinuierlichen und umgekehrt.

Man kann zeigen, daß sich die Abgrenzung der physikalischen Äquivalente der diskreten und der kontinuierlichen Geometrie aus der Relativitätstheorie bei ihrer natürlichen Verallgemeinerung auf ultramikroskopische Gebiete ergibt.

Nach der Relativitätstheorie befinden sich Körper, die sich langsamer als das Licht bewegen, innerhalb des sogenannten Lichtkegels. Prozesse mit Lichtgeschwindigkeit befinden sich auf dem Lichtkegel. Um Prozesse im Lichtkegel mit Prozessen auf dem Lichtkegel verbinden zu können, muß man annehmen, daß Teilchen mit Unterlichtgeschwindigkeit und von Null verschiedener Ruhemasse an Prozessen auf dem Lichtkegel teilnehmen können. Unter gewissen Voraussetzungen können Prozesse auf ihm gesetzmäßig eine Diskretheit der Raumzeit verursachen. Nehmen wir zum Beispiel an, daß ein Teilchen mit von Null verschiedener Ruhemasse in einem gegebenen Punkt annihiliert wird und etwa 10^{-24} Sekunden später etwa 10^{-13} cm davon entfernt eine Paarbildung erfolgt und daß derartige Paarbildungen die elementaren Ereignisse darstellen, aus denen sich die Weltlinie des Teilchens zusammensetzt.[1] Wir können ein Teilchen, das sich in einer Nachbarzelle der Raumzeit bildet, mit dem annihilierten Teilchen identifizieren und so die Vorstellung von der Translation eines mit sich selbst identischen Teilchens einführen, das sich mit der Geschwindigkeit $\varrho/\tau = c$ bewegt und sich somit auf dem Lichtkegel befindet. Die Neubildungstranslationen bilden die ultramikroskopische Flugbahn des Teilchens. Hier haben wir es weder mit einem diskreten Raum noch mit einer diskreten Zeit, sondern mit einer diskreten Raumzeit zu tun.

Die makroskopische Flugbahn des Teilchens unterscheidet sich von seiner mikroskopischen. Auf letzterer hat das Teilchen beständig Lichtgeschwindigkeit und führt auf der räumlichen Hyperebene zufällige Schwankungen in verschiedener Richtung aus. Die makroskopische Geschwindigkeit des Teilchens hängt von der räumlichen Unsymmetrie der Wahrscheinlichkeiten der Neubildungen ab; sind die Wahrscheinlichkeiten für alle Raumrichtungen gleich, so befindet sich das Teilchen nach einer großen Zahl zufälliger Schwankungen nahe seinem Anfangsort, erst bei Wahrscheinlichkeitsunsymmetrie längs einer bestimmten Linie wird die makroskopische Geschwindigkeit entlang dieser Linie ungleich Null, so daß es sich längs dieser Linie bewegt, allerdings immer mit Unterlichtgeschwindigkeit. So erfolgt die makroskopische Bewegung jenes Teilchens innerhalb des Lichtkegels. Die Raumzeit ist hier diskontinuierlich, und so ergibt sich eine solche Bestimmung als physikalisch sinnvoll.

Aus dem Gesagten wird nicht nur der Grenzcharakter der Lichtgeschwindigkeit in bezug auf alle mechanischen Geschwindigkeiten ersichtlich, sondern auch

[1] Vgl. J. I. Frenkel, Доклад. АН СССР, 64, 1949, S. 509; Успехи физических наук 42, вып. 1, 1950, S. 69; Б. Г. Кузнецов, Об основах кванто — релятивистской логики, in: Логические исследования, Москва 1959, S. 99—112; ders., Принцип относительности в античной, классической и квантовой физике, Москва 1959, S. 211—230; ders., Этюды об Эйнштейне, Москва 1965, S. 144—147.

die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit gegenüber Koordinatentransformationen. Das folgende Schema soll eine solche prinzipielle Möglichkeit illustrieren.

Die Richtung der oben genannten Wahrscheinlichkeitsunsymmetrie, die mit der makroskopischen Flugbahn L zusammenfällt, ändert sich beim Übergang von einem Koordinatensystem zum anderen. Auch der Grad der Unsymmetrie $p(\varrho_L) - p(\varrho_{-L})$ ändert sich. (ϱ_L ist die Verschiebung in Richtung L, ϱ_{-L} ist die Verschiebung in entgegengesetzte Richtung.) Man kann die Dissymmetrie „wegtransformieren": Wenn man ein Koordinatensystem wählt, in dem sich die Flugbahn zu einem Punkt zusammenzieht, dann heben sich die Schwankungen in einer beliebigen Richtung mit denen in entgegengesetzter Richtung auf. Dann wird

$$p(\varrho_L) - p(\varrho_{-L}) = 0.$$

Gehen wir nun von der Unsymmetrie der Wahrscheinlichkeiten zu ihrer Ausbreitung über. Es geht nicht um die Translationen der Teilchen, sondern um die Verschiebungen des Verhältnisses der Wahrscheinlichkeiten selbst. Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses drückt sich in der Quantenmechanik im Übergang von den nur wahrscheinlichen Werten der Koordinaten und des Impulses eines Teilchens zu den sicheren Werten der Wellenfunktionen aus, nach welchen man die Wahrscheinlichkeit der dynamischen Variablen des Teilchens beurteilen kann. Die Größe $p(\varrho_L) - p(\varrho_{-L})$ charakterisiert jede Verschiebung, es wird gewissermaßen in jedem Elementarintervall dauernd gewürfelt, wie immer auch der Ausgang ausfallen möge. „Der Ausgang des Spieles" zeigt sich in der Länge der Flugbahn und entsprechend der Zeiteinheit in der Makrogeschwindigkeit v, aber das „Spiel" selbst geht von einem Abschnitt zum nächsten mit der Geschwindigkeit $\varrho/\tau = c$ über, gleichgültig, in welchem Bezugssystem wir die Teilchengeschwindigkeit bestimmen. Jedesmal wird das Spiel mit einem invarianten vierdimensionalen Abschnitt μ als Längenelement der makroskopischen Weltlinie gespielt, die bei Abwesenheit von Gravitationsfeldern die Länge

$$\sqrt{3\varrho^2 - c^2\tau^2}$$

besitzt.

Aus dem Grenzcharakter von $\varrho/\tau = c$ ergibt sich die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit. Wir können diese relativistische Gesetzmäßigkeit aus der Beziehung zwischen der Symmetrie zufälliger Schwankungen des Teilchens und dem die Unsymmetrie schaffenden Feld ableiten.

Je stärker letzteres ist, um so mehr wird die Symmetrie der zufälligen Schwankungen überwunden, und daraus resultiert dann die Makrogeschwindigkeit v des Teilchens. Je größer die bereits bestehende Unsymmetrie ist, um so größer muß die Intensität des zusätzliche Dissymmetrie schaffenden Feldes sein, so daß v erhöht beziehungsweise das Teilchen beschleunigt wird. So können wir die Symmetrie der zufälligen Schwankungen des Teilchens, die „Entropie" der Bewegung des Teilchens, die Unbestimmtheit seiner Verschiebung der *Teilchenmasse* zuordnen, welche der Geschwindigkeit v proportional ist. Diese Geschwin-

digkeit drückt die Unsymmetrie der Verschiebung, sozusagen die „Negentropie“ der Teilchenbewegung aus.

Dieses Schema der diskreten Raumzeit auf dem Lichtkegel soll nur illustrieren, daß man Transmutationen zu jenen Ausgangsprozessen rechnen kann, mit deren Beschreibung heute der Aufbau einer wissenschaftlichen Konzeption vom Weltgebäude zu beginnen hat.

Die Analyse dieses Schemas führt zu dem Schluß, daß die Umwandlungsprozesse an sich ebensowenig Bausteine des Weltgebäudes sein können wie die Bewegungen von mit sich selbst identischen Teilchen.

Zum gleichen Schluß kommen wir, wenn wir die Resultate jener Probleme, die sich durch die ganze Geschichte der Physik hindurchziehen, analysieren. Eines dieser Probleme, die ständig neue Formen angenommen haben, aber nie verschwunden sind, ist das der Unterscheidbarkeit zwischen *physikalischen* und geometrischen Objekten. Sie war eine der schwierigsten Aufgaben für jede Konzeption, die auf qualitative Stoffunterschiede verzichtete und die feststellbaren Unterschiede auf Form und Größe diskreter Körper zurückführte. Die cartesische Physik hatte keinen Unterschied zwischen einem Körper und dem von ihm eingenommenen *Ort* finden können, daher besaß sie keine Individualisierungsmöglichkeit für einen Körper. Leibniz sah diese Achillesferse der cartesischen Physik und begabte daher den Stoff mit dynamischen Eigenschaften. Aber um die Masse eines Körpers angeben zu können, muß man sein Verhalten kennen, muß man über einen Körper sprechen können, der nicht nur am gegebenen Ort und zu gegebener Zeit mit sich identisch ist, sondern auch an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten. Man muß vom *bewegten*, mit sich selbst identischen Körper sprechen können, und man muß in die Definition des Körpers das Gesetz einbeziehen, das seine Bewegung bestimmt.

Infolge der Entwicklung atomistischer Vorstellungen nahm das genannte Problem die Form einer Abgrenzung von Teilchen und Weltlinie an. Ein *Ereignis*, das Vorhandensein eines Teilchens in einem Weltpunkt, reduziert sich nicht auf die Vereinigung der vier Raum- und Zeitkoordinaten. Das *Verhalten* eines Teilchens reduziert sich nicht auf den Übergang von einem Weltpunkt zu einem anderen, auf eine Weltlinie bestimmter Form. Weltpunkt und Weltlinie können reine Gedankenkonstruktionen sein, ihnen kommt das Prädikat der Existenz ohne die Vorstellung eines irgendwie „nichtcartesischen“ Prozesses nicht zu, das heißt eines Prozesses, der sich nicht auf die Anwesenheit in einem Weltpunkt und nicht auf den Übergang zu einem anderen Weltpunkt reduzieren läßt. Nehmen wir einmal an, daß ein solcher „nichtcartesischer“ Prozeß mit der Elementartransmutation eines Teilchens gegeben sei, es liege etwa eine solche Umwandlung vor, wie sie in der Raumzeitzelle erfolgt. Das wäre ein Schritt zu einem Transmutationsweltbild, wenn nur der Begriff der Transmutation als rein lokaler Begriff, ohne den Makrobegriff der Weltlinie, nicht ohne physikalischen Gehalt wäre.

Was besagt eigentlich der Satz „Ein Teilchen gegebenen Typs verwandelt sich in ein Teilchen eines anderen Typs?“ Der Typ des Teilchens wird durch die bestimmte Art seiner Weltlinie charakterisiert. Die Umwandlung des Teilchens ist daher der Übergang von einer zu einer anderen eventuellen Weltlinie.

Also entzieht die neue Physik den Bewegungen mit sich selbst identischer Teilchen weder den Titel „Ausgangsprozesse", „Bausteine des Weltgebäudes", noch verleiht sie den ultramikroskopischen Umwandlungen diesen Titel.

Das neue physikalische Weltbild ist vielmehr mit einem radikaleren Umschwung verknüpft. Es verzichtet überhaupt auf den Begriff der Elementarprozesse und geht statt dessen sogleich von der Komplementarität des makroskopischen und des mikroskopischen Aspektes des Weltgebäudes aus.

Der Terminus *Komplementarität* bedeutet Einwirkung der makroskopischen Definition auf die ultramikroskopische und umgekehrt. Jedes Experiment, das die Richtung einer gegebenen Weltlinie in einem gegebenen Weltpunkt fixiert, ist mit einer Variation dieser Weltlinie verbunden, also mit anderen Prädikaten des mit sich selbst identischen Teilchens; folglich mit einer Transmutation. Jeder Versuch, den raumzeitlichen Ort eines Teilchens zu bestimmen, ist mit einer Verschiebung, mit einem Übergang zu einem anderen Weltpunkt verknüpft.

Aus den rein hypothetischen Konstruktionen, die weniger die gegenwärtige physikalische Theorie illustrieren als vielmehr wissenschaftshistorische Feststellungen, folgt, daß sich die die Physikentwicklung durchziehende Idee der Homogenität und Kontinuität der Raumzeit vielleicht als Approximation erweisen wird. Sie läßt sich aus dem Weltbild nicht streichen, aber sie ist komplementär bezüglich eines anderen Aspektes, der Vorstellung diskreter Umwandlungsprozesse in ultramikroskopischen Raumzeitbereichen. Wenn eine physikalische Konzeption uns nur eine gewisse Annäherung liefert, so hat die wissenschaftshistorische Analyse zu zeigen, unter welchen Umständen sie eine ausreichende Annäherung an die objektive Realität ist. Das ist der Ausgangspunkt für die anschließenden eigentlich historischen Bewertungen. Gerade um die prinzipielle Möglichkeit einer historischen Rückschau in bezug auf die Homogenität der Raumzeit zu zeigen, mußten wir das verhältnismäßig hypothetische Schema der diskreten Bewegung eines Teilchens mit einer von Null verschiedenen Ruhemasse auf dem Lichtkonus usw. darlegen.

Nun können wir die Idee der Homogenität, anfangs die des Raumes, dann die der Zeit, der Raumzeit und schließlich der makroskopisch approximierten Raumzeit betrachten. Die Homogenität spielte schon in der Entwicklung der physikalischen Ideen vor 1900 eine fundamentale Rolle. Wir können nun zu den Ideen der Trägkeit und der Kraft noch einmal zurückkehren, zu den Prinzipien der Erhaltung und der Irreversibilität, und prüfen, welche Form sie in unserer Zeit angenommen haben. Es geht uns in gewisser Weise um einen Epilog zur klassischen Physik, der an die früher verbreitete Manier erinnern mag, eine lange Erzählung mit einem Bilde des jetzigen Lebens ihres Helden zu beschließen.

2. Die Homogenität des Raumes

Im Jahre 1918 zeigte Emmi Noether, daß die Invarianz einer bestimmten Größe gegen eine bestimmte Gruppe von Transformationen, das heißt bezüglich der Homogenität einer gegebenen Mannigfaltigkeit, ein Erhaltungsgesetz bein-

haltet.[2] Nehmen wir als eine derartige Mannigfaltigkeit den dreidimensionalen Raum. Bei Bewegung in ihm, bei Veränderung der Raumkoordinaten also, bleibt die uns schon bekannte Lagrange-Funktion unverändert. Aus ihrer Konstanz folgt, daß im betrachteten System innere Prozesse nicht von Koordinatenveränderungen abhängen. Eine solche Konstanz des Verhaltens führt dazu, daß sich die Geschwindigkeitskomponenten der dem System angehörenden Körper nicht ändern und demgemäß auch nicht die Komponenten der Impulse.

Jetzt können wir sagen: Das heutige physikalische Weltbild ist zusammen mit der Idee der Homogenität des Raumes entstanden, obwohl es diesen Terminus im 17. Jahrhundert noch nicht gab. Im ersten Kapitel dieses Buches ist gesagt worden, daß bei Galilei gleichwertige Raumpunkte, Punkte, deren Unterschiede sich nicht auf den Gang der Prozesse im sich bewegenden System auswirken, eine krumme Linie oder, allgemeiner, eine Kugeloberfläche bilden. In dieser Beziehung hat, wie wir sahen, Galilei die Aristotelische Konzeption beibehalten.

Schon vor Aristoteles war der Raum isotrop geworden, insofern als man mit dem absoluten Oben und Unten zusammen mit der Vorstellung, die Erde sei eine Scheibe, gebrochen hatte. Aber die Erde erschien als Zentrum des Weltraumes, als bevorzugter Punkt gegenüber den anderen Raumpunkten, und die verschiedenen Körper hatten ihre unterschiedlichen sogenannten natürlichen Orte (diese waren wiederum untereinander nicht gleichberechtigt) in unterschiedlichen Abständen von der Erde beziehungsweise vom Erdmittelpunkt.

Gleichberechtigt sind bei Aristoteles Punkte mit gleichem Abstand von der Erde, und homogen ist jeweils nur die Oberfläche jeder der aristotelischen Sphären. (Natürlich gilt all das nur unter den Vorbehalten, die schon im ersten Kapitel gemacht wurden: Nicht von den Begriffen der Homogenität und der Krümmung des Raumes ist hier die Rede, denn die gab es im Altertum noch nicht, sondern von den an die Zukunft adressierten *Fragen* der antiken Wissenschaft.)

Bei Galilei gab es keine „natürlichen Orte" in unterschiedlichen Abständen von der Sonne. Aber in positiver Form wird die Homogenität des Raumes den *kreisförmigen* Bahnen der Planeten zugeschrieben. Warum bewegt sich die Erde kreisförmig? Galilei verweist auf die Trägheit und verzichtet darauf, als Ursache dieser Bewegung noch eine von der Tätigkeit unabhängige zweite Komponente der Kreisbewegung zu betrachten. Alles, was Galilei im „Dialog" über die Bewegung eines sich selbst überlassenen Körpers sagt, begründet die Bewegung der Planeten auf Kreisbahnen. Können wir mit dieser Konzeption der Inertialbewegung den Begriff der Homogenität des Raumes verbinden?

Die Antwort hierauf kann nur in Verbindung mit der allgemeinen Relativitätstheorie gegeben werden, denn sie verallgemeinert den Begriff der Homogenität auf einen gekrümmten Raum. Der Körper, der sich auf einer geodätischen Linie bewegt, befolgt das allgemeine Trägheitsprinzip. Wir betrachten ihn als sich selbst überlassen innerhalb der geometrischen Beziehungen des gegebenen Raumes. Die Schwere sehen wir als eine Eigenschaft des Raumes an, als eine Abweichung

[2] Vgl. E. Noether, Invariante Variationsprobleme (F. Klein zum fünfzigsten Doktorjubiläum), in: Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-phys. Kl. 1918, S. 235–257.

von der euklidischen Metrik, als eine Krümmung. Von einem derartigen Standpunkt aus erscheint das Prinzip der kosmischen Trägheit als Analogon zur Idee der Homogenität eines gekrümmten Raumes. Wir betonen nochmals: Es geht hier nicht um eine „Vorwegnahme“ der allgemeinen Relativitätstheorie. Wir überzeugen uns nur nochmals davon, daß die Weltanschauung Galileis eine echte Introduktion in die klassische Physik war, in der noch ungefestigte und undifferenzierte Motive miteinander verschlungen sind und ineinander übergehen; Motive, die sich aber später klären und eine echte klassische Polyphonie schaffen werden. Aber die undifferenzierte Keimform dieser Motive wird uns erst als solche bekannt, nachdem wir die Sinfonie zu Ende gehört haben.

Als erstes schälte sich aus der anfänglichen, noch unentfalteten Konzeption der Gedanke der geradlinigen und gleichförmigen Bewegung heraus. Descartes, der einem kräftefreien Körper eine geradlinige Flugbahn zuschrieb, kam zur Idee des „ebenen“ homogenen Raumes. Die Inertialbewegung wurde dabei als ein unveränderlicher Zustand angesehen. Veränderungen wurden durch Wechselwirkungen zwischen den Körpern erklärt. Betrachten wir diese Descartessche Idee in historischer Rückschau, so unterscheidet sich die geradlinige Inertialbewegung grundsätzlich von der krummlinigen in Galileis „Dialog“. Die Konzeption gleichförmiger Kreisbewegungen fand nicht das, was Einstein „äußere Bewährung“ nannte. Galileis Schema widerspricht also der unbezweifelbaren Existenz der Gravitation, der ebenfalls zweifelsfreien elliptischen Form der Bahn der Planeten und ihren veränderlichen Geschwindigkeiten. Demgegenüber entspricht Descartes' Konzeption und der aus ihr erwachsene Begriff der geradlinigen Trägheitsbewegung der klassischen Mechanik in allen bekannten Fakten. Daß man krummlinige Bewegungen als durch Kraftfelder hervorgerufen ansah, war durch viele Tatsachen bestätigt. Die allgemeine Relativitätstheorie hatte, verglichen mit der klassischen Darstellung, größere „innere Vollkommenheit“.

Wenn man die physikalischen Anschauungen der Vergangenheit als *an die Zukunft adressierte Fragen* auffaßt, so erweist sich Descartes' Trägheitsauffassung als ein Glied der ununterbrochenen historischen Entwicklung, das mit den Ideen Galileis verbunden ist. Bei Galilei wie schon bei Aristoteles bestand das ungelöste, in die Zukunft weisende Problem der Bewegung in dem Beiwort „vollkommen“, das der Kreisbewegung zugeschrieben wurde. Welchen Sinn hatte dieses Attribut? Descartes hatte erkannt, daß die gerade Linie bereits im Anfangspunkt determiniert wird, eine Kurve aber noch zusätzliche Angaben fordert. Dem Wesen nach ist diese veränderte Auffassung der Inertialbewegung verbunden mit einer differentiellen Vorstellung: Eine Gerade wird durch die Bedingungen in einem unendlich kleinen Gebiet festgelegt, die sich in einem endlichen Gebiet nicht ändern. Aber wir können dieses ganze Schema in einen gekrümmten Raum übertragen — das ist ja der Sinn der uns schon bekannten kovarianten Differentiation. Darum sind es in der allgemeinen Relativitätstheorie die geodätischen Linien als natürliche Verallgemeinerung der Geraden, auf denen sich kräftefreie Körper bewegen. Die „vollkommenen“ Kreisbahnen Galileis, die „einfachsten“

Geraden Descartes' und die geodätischen Linien der allgemeinen Relativitätstheorie sind drei Antworten, eine immer rationaler als die andere, auf die Frage nach der Bewegung eines Körpers.

Aber hier ist noch ein weiteres Zwischenglied zu nennen: Im 19. Jahrhundert begann man, die Gerade — auf der sich ein kräftefreier Körper bewegt — als Spezialfall der Bewegung eines Körpers in einem gegebenen Feld zu betrachten. Die Bewegung wird als kleinste Größe der Wirkung definiert. In der heutigen Physik verbindet man immer häufiger die kleinste Wirkung mit der *größten Wahrscheinlichkeit einer Weltlinie.*[3] Diese Tendenz wird der historischen Rückschau ermöglichen, das Problem der makroskopischen Bewegung von einem neuen Blickpunkt zu betrachten.

Die Konzeption der geradlinigen Inertialbewegung erreichte ihre relative Vollendung, als die Wirbeltheorie von Descartes durch den Begriff des Kraftfeldes ersetzt wurde, als Newton die phänomenologische Auffassung der entfernungsabhängigen Wechselwirkung von Körpern einführte, aus der dann die Grundthesen des klassischen Weltbildes formuliert wurden:

1. Das Verhalten von Körpern wird bei Abwesenheit anderer, mit ihnen wechselwirkender Körper durch die Eigenschaften des Raumes bestimmt. Da der Raum eben, homogen und isotrop ist, befinden sich kräftefreie Körper in Ruhe oder in geradliniger und gleichförmiger Bewegung.
2. Alle eigentlichen physikalischen, das heißt nicht aus Eigenschaften des Raumes ableitbaren, Prozesse werden durch Wechselwirkungen der Körper erklärt. Sie sind abhängig von deren Lage und Bewegung. (Dies bezeichnete Einstein als das „Machsche Prinzip".)

3. Die Homogenität der Zeit

Die Verallgemeinerungen des ersten und zweiten Newtonschen Gesetzes haben ihre Bedeutung bis zur allgemeinen Relativitätstheorie und zur Entwicklung der Feldvorstellungen im 20. Jahrhundert behalten (Isotropie eines gekrümmten Raumes und dessen Auffassung als etwas, was an der Wechselwirkung der Körper teilnimmt).

Aber unumschränkt herrschten sie nur in jenen rein mechanischen Modellen, die keinen Platz für von Ortsveränderungen unabhängige zeitliche Veränderungen ließen. Als die Temperaturänderungen zunehmend die Aufmerksamkeit der Physiker erlangten, als sich zeigte, daß man hierfür Verschiebungen einzelner Teilchen weder berücksichtigen konnte noch mußte, prägte man die Begriffe der inneren Energie eines ruhenden Systems und der zeitlichen Veränderung des

[3] Vgl. R. P. Feynman, Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics, in: Rev. Mod. Phys. vol. 20, 1948, S. 367—387; ders., The Theory of Positrons, in: Physical Review, Vol.76, 1949, S. 749—759; ders., Space-Time Approach to Quantum electrodynamics, ebenda, S. 769—789; Б. Г. Кузнецов, Об основах кванто — релятивистской логики, a. a. O., S. 99—112.

Systemzustandes. Den Energiebegriff hatte man freilich schon früher innerhalb der Mechanik angewandt. Die Energie eines Körpers charakterisierte sein Verhalten von Zeitpunkt zu Zeitpunkt, genauso wie der Impuls es von Raumpunkt zu Raumpunkt tat. Doch beide Maße der Bewegung bezogen sich auf ein und denselben Prozeß, im einfachsten Fall auf den Übergang eines Teilchens von einem Ort in einem Zeitpunkt nach einem anderen Ort im nächsten Zeitpunkt. Die Zusammenhänge zwischen den Verschiebungen in der Zeit und denen im Raum waren die Grundlage einer *trivialen* vierdimensionalen Auffassung, die dazu führte, daß Impuls und Energie als zwei Größen fungierten, die ein und denselben Prozeß maßen.

Engels hat hervorgehoben, daß die Energie das Maß derjenigen Bewegung ist, die aus der einfachen Form der mechanischen Ortsveränderung in kompliziertere Formen übergeht.[4] Die Entwicklung der Thermodynamik zeigte, daß die Energie tatsächlich nicht nur das Maß sich in der Zeit räumlich verschiebender Körper ist, sondern auch der Prozesse, die sich nur statistisch auf die Bewegung von Teilchen zurückführen lassen und im ruhenden System vonstatten gehen, also in Körpern, denen man keinen Impuls zuschreiben kann.

Für die Bewegung eines materiellen Punktes sind die beiden Maße vor allem deshalb untrennbar, weil Raum und Zeit voneinander nicht zu trennen sind. Weil der Raum homogen ist, kann man gemäß dem klassischen Relativitätsprinzip mit Hilfe der Galilei-Transformationen eine räumliche Translation „wegtransformieren". Dann erhalten wir aus der Erhaltung des Impulses die Erhaltung der Energie und umgekehrt. Dieser Gedanke ist schon bei Huygens zu finden, der dabei vom klassischen Relativitätsprinzip ausging. Der Sinn seiner Konzeption ist folgender: Wenn bei Stößen das Leibnizsche Maß der Bewegung für das Gesamtsystem erhalten bleibt, dann kann man daraus die Erhaltung des cartesischen Maßes der Bewegung ableiten. Dazu muß man dieses System in Bewegung betrachten, so wie ein Mensch, demgegenüber das ganze System einander stoßender Körper sich bewegt. Der Beweis hat folgende Form[5]:

Die Massen der Systemelemente, der Teilchen, seien m_i, ihre Geschwindigkeit $\mathfrak{u}_i$. Nach den Stößen sollen diese $\mathfrak{U}_i$ sein. Wegen Erhaltung der Energie gilt:

$$\frac{1}{2} \sum_i m_i \mathfrak{u}_i^2 = \frac{1}{2} \sum_i m_i \mathfrak{U}_i^2.$$

Nun möge das gesamte System eine zusätzliche Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ besitzen. Die Geschwindigkeiten der Teilchen werden nunmehr vor den Stößen $\mathfrak{u}_i + \mathfrak{v}$ und nach ihnen $\mathfrak{U}_i + \mathfrak{v}$ betragen. Wieder gilt wegen des Energieerhaltungs-

[4] F. Engels, Dialektik der Natur, in: K. Marx/F. Engels, Werke, Bd. 20, Berlin 1962, S. 354—369.

[5] В. Паули, Закон сохранения в теории относительности и в античной физике. Доклад в университете им. Н. Д. Зелинского, in: Современные проблемы физико — химии и химической технологии, сб. II, Москва 1938, S. 22.

gesetzes:

$$\frac{1}{2}\sum_i m_i(\mathfrak{u}_i + \mathfrak{v})^2 = \frac{1}{2}\sum_i m_i(\mathfrak{U}_i + \mathfrak{v})^2 \text{ bzw.}$$

$$\frac{1}{2}\sum_i m_i(\mathfrak{u}_i^2 + 2\mathfrak{u}_i\mathfrak{v} + \mathfrak{v}^2) = \frac{1}{2}\sum_i m_i(\mathfrak{U}_i^2 + 2\mathfrak{U}_i\mathfrak{v} + \mathfrak{v}^2).$$

Also: $\sum_i m_i\mathfrak{v}\mathfrak{u}_i = \sum_i m_i\mathfrak{v}\mathfrak{U}_i$

und $\mathfrak{v}\sum_i m_i\mathfrak{u}_i = \mathfrak{v}\sum_i m_i\mathfrak{U}_i.$

Die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ ist willkürlich wählbar, daher ist die letzte Gleichung nur für den Fall richtig, daß

$$\sum_i m_i\mathfrak{u}_i = \sum_i m_i\mathfrak{U}_i.$$

Mit anderen Worten: Der Impuls des Systems vor den Zusammenstößen seiner Teilchen, der durch den linksstehenden Ausdruck dargestellt wird, bleibt nach den Zusammenstößen erhalten. Die relativistische Verschmelzung der Erhaltungssätze für Impuls und Energie unterscheidet sich von Huygens' Idee nur in der Modifikation des Energiebegriffes auf Grund von 200 Jahren Physikentwicklung. Die Vereinigung der beiden Gesetze hängt nicht von der bestimmten Form der Funktion ab, die die Energie an die Geschwindigkeit bindet. Dies folgt aus allgemeinen Überlegungen über Raum und Zeit. Folglich stellen wir uns die Energie als eine gewisse willkürliche Geschwindigkeitsfunktion vor, die mit der Masse multipliziert ist

$$E = mf(\mathfrak{u}).$$

Die Energie ist eine skalare Größe. Daher kann sie, dank der Isotropie des Raumes, nicht von der Richtung, sondern nur vom skalaren Wert des Geschwindigkeitsvektors abhängen. Darum gilt:

$$E = mf(u).$$

Der Impuls eines Körpers ist räumlich orientiert. Er fällt mit der Richtung der Geschwindigkeit $\mathfrak{u}$ zusammen, und sein absoluter Betrag ist eine Funktion $g(u)$ des absoluten Betrages der Geschwindigkeit u.

$$\mathfrak{p} = m\mathfrak{u}g(u).$$

Drückt man die Sätze über Energie und Impuls als Funktionen $f(u)$ und $g(u)$ der Geschwindigkeit aus, so kann man beide Erhaltungssätze wie folgt schreiben:

$$\sum_i m_i f(u_i) = \sum_i m_i f(U_i)$$

$$\sum_i m_i\mathfrak{u}_i g(u_i) = \sum_i m_i\mathfrak{U}_i g(U_i).$$

Nun kann man die Arten von $f(u)$ und $g(u)$ bestimmen, bei denen die Erhaltungsgesetze für ein beliebig bewegtes Bezugssystem gültig bleiben. Es zeigt sich, daß dieser Forderung nur eine Art Funktion $f(u)$ und nur eine Art $g(u)$ Genüge leistet. $f(u)$ muß gleich dem Quadrat und $g(u)$ gleich dem absoluten Betrag von $\mathfrak{u}$ sein. Folglich führt die Kovarianzforderung für beide Erhaltungsgesetze zu den bekannten Ausdrücken:

$$E = mu^2,$$

$$\mathfrak{p} = m\mathfrak{u}.$$

Zu beiden Ausdrücken gelangt man auch, wenn man von der Forderung ausgeht, daß beide Erhaltungsgesetze für sämtliche Inertialsysteme gelten sollen. Diese Ausdrücke bleiben auch in der Relativitätstheorie gültig, mit einer Veränderung: Statt der klassischen Summenformel für zwei Geschwindigkeiten $u + v$ muß man die relativistische Summe

$$u' = (u + v) \Big/ \left(1 + \frac{uv}{c^2}\right)$$

nehmen.

Aber die Erhaltungssätze für Energie und Impuls erleiden in der Relativitätstheorie doch eine entscheidende Umformung: Sie verschmelzen zu einem einzigen Gesetz. Die drei Impulskomponenten und der skalare Wert der Energie werden in einem vierdimensionalen Energie-Impuls-Vektor zusammengefaßt. Dies ist das natürliche Ergebnis der Vereinigung von Raum und Zeit zu einer vierdimensionalen Wesenheit. Ihr werden wir uns später zuwenden, erst verweilen wir noch bei dem physikalischen Allgemeinbegriff, den man für die Erfassung der Irreversibilität statistischer Prozesse benötigt.

4. Die Anisotropie der Zeit

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik verweist auf die Homogenität der Zeit, der zweite auf ihre Anisotropie: Die Richtung, in der die Zeit zunimmt, und die inverse Richtung sind physikalisch nicht gleichberechtigt, der Gang der physikalischen Ereignisse ist nicht umkehrbar. Relativitäts- und Quantenphysik haben diesem um 1860 gefundenen Prinzip einige neue Ideen hinzugefügt:

Die Thermodynamik der Weltallmodelle, die sich etwa 1930 bis 1950 entwickelte, ist genetisch mit der kosmischen Fluktuationstheorie Boltzmanns verbunden, geht aber von der relativistischen Kosmologie aus, die Einstein (1917), Friedman (1922) und andere Wissenschaftler in den zwanziger Jahren geschaffen haben. In den dreißiger Jahren wurden die Probleme der Irreversibilität und der Entropie eines expandierenden und eines pulsierenden Weltalls analysiert. Tolman kam dabei zu dem Schluß, daß die Gesamtentwicklung der Welt gerichtet, irreversibel und unbegrenzt sei. Die Entropie der Welt wächst unbeschränkt, aber ihr monotones

Wachstum führt zu keinem Gleichgewicht. Der Begriff eines solchen Zustandes und dementsprechend der der maximalen Entropie sind auf das Weltall als Ganzes unanwendbar. Boltzmanns Weltallmodell schließt ein Wärmegleichgewicht ein. Das führt jedoch nicht zum Wärmetod, da Fluktuationen das Gleichgewicht in intergalaktischen Maßstäben immer wieder zerstören. Das unendliche Weltall zeigt keine monotone, irreversible Entwicklung, und die Zeit ist in ihm nicht anisotrop. Es kennt keinen Wärmetod, weil es als Ganzes kein „Wärmeleben" kennt, keinen Übergang von einem gesamtuniversellen Zustand in einen anderen. Die im Nichtgleichgewicht befindlichen „lebendigen" Teile des Weltalls können eine Vielzahl Galaxien umfassen, aber es sind verschwindend wenige in bezug auf das gesamte Weltall. Das „Leben" ist im Weltall eine Kräuselung auf der Oberfläche eines unbewegten Ozeans. Kann dieser Ozean eine gerichtete Strömung besitzen? Kann er als unendlich breiter Strom angesehen werden? Gibt es ein kosmisches Äquivalent für den Begriff der irreversiblen Zeit?

Boltzmanns Theorie schloß eine solche Möglichkeit nicht aus, zog sie aber auch nicht in Erwägung. Der unendliche Hintergrund örtlicher Fluktuationen, also sich entwickelnder irreversibler Prozesse mit Entropiewachstum und ihm vorausgegangenen entgegengesetzten Prozessen, ist ein im ganzen im Gleichgewicht befindliches Weltall. Die gigantischen intergalaktischen Fluktuationen vermögen dieses Gleichgewicht genausowenig zu verletzen wie die durch die Brownsche Bewegung hervorgerufenen.

Die relativistische Thermodynamik kann bei der Betrachtung des Weltalls als Ganzes von verschiedenen Annahmen über seine Endlichkeit, Begrenztheit und raumzeitliche Geschlossenheit ausgehen. In diesen Fragen ist die Kosmologie nur zu sehr vorläufigen Konzeptionen gelangt. Die neuesten Vorstellungen über die nichtumkehrbare Entwicklung des Kosmos sind mit der Quantenmechanik und den Wechselwirkungen der Elementarteilchen verbunden. Sie sollen aber hier nicht betrachtet werden.

5. Die Homogenität der Raumzeit

Wir haben bereits früher den Energie-Impuls-Vektor und die Verschmelzung der Prinzipe der Homogenität des Raumes und der Zeit zu einem einzigen Prinzip der Homogenität der Raumzeit behandelt. Es ging dabei zunächst um die Homogenität des „ebenen", ungekrümmten pseudoeuklidischen raumzeitlichen Kontinuums.

Beträchtlich schwieriger ist die *Homogenität der gekrümmten Raumzeit* zu formulieren, die die allgemeine Relativitätstheorie behandelt.

In dieser gibt es zusammen mit den Gleichungen, die den Krümmungstensor mit dem Energie-Impuls-Tensor verknüpfen, vier *Identitäten*, deren physikalischer Sinn sehr schwer darzulegen ist, wenn man ohne Niederschrift derselben und der mit ihnen zusammenhängenden vielgliedrigen und komplizierten mathematischen Ausdrücke auskommen will. Trotzdem sei es im folgenden versucht.

In der Einsteinschen Gleichung für das Gravitationsfeld steht links der Krümmungstensor, dessen zehn Komponenten angeben, wie sich in einem gegebenen

Punkt die Richtung jedes Vektors ändert, das heißt seine skalaren Komponenten in Abhängigkeit von der Krümmung, die jede Raumzeitrichtung charakterisiert. Rechts stehen die zehn Komponenten des Energie-Impuls-Vektors. Aber abgesehen von der Verbindung der beiden Tensoren, müssen noch einige allgemeine krümmungsunabhängige Eigenschaften der Raumzeit mit beschrieben werden: ihre Homogenität, welche den Übergang von einem Koordinatensystem zu einem anderen gestattet. Die Komponenten des Krümmungstensors sind von einem solchen Übergang unabhängig; für alle Koordinatensysteme sind es dieselben. Darum geht es hier um mathematische Identitäten, die sich ganz aus der Methode ergeben, durch die die Komponenten des Krümmungstensors gebildet werden.

Die allgemeine Relativitätstheorie zeigt weiter, daß besagten Identitäten Gleichungen entsprechen, die einen bestimmten physikalischen Sinn haben.

Solange wir von den Komponenten des Krümmungstensors sprechen, genügt es, zu zeigen, daß sie in allen Koordinatensystemen mit sich identisch sind. Das sind einfache Identitäten. Ihre Form hängt von den mathematischen Verfahren ab, die für die Bildung jenes Tensors benutzt werden. Beim Energie-Impuls-Tensor entsprechen den eben behandelten Identitäten vier *Erhaltungsgesetze* für Energie und Impulse.

Warum erweisen sich geometrische Darstellungen dieser physikalischen Gesetze als einfache Identitäten?

Die Raumzeit hat zweierlei Eigenschaften. Die ersten bedürfen keines Bezugskörpers und sind in diesem Sinn absolut. Für sie ist die Untrennbarkeit der vier Komponenten der Raumzeit charakteristisch. Beispiel dieser Eigenschaften ist die Metrik. Beim Übergang von den Differentialen dieser Komponenten zum entsprechenden vierdimensionalen Intervall verschmelzen wir die relativen, eines Bezugskörpers bedürftigen Größen zu einer einzigen vierdimensionalen absoluten Größe.

Wenn wir aus den Koordinatendifferentialen das Krümmungsmaß der Raumzeit ableiten, so verbleiben in dem Ausdruck für die Krümmung Angaben über die Koordinaten, die vom Bezugssystem abhängen und für den invarianten „verschmolzenen" vierdimensionalen Ausdruck überflüssig sind. Diese werden nun mit Hilfe genannter vier Identitäten beseitigt, die auf die Identität der Krümmung in den verschiedenen Koordinatensystemen hinweisen. Für die Krümmung als eine invariante Eigenschaft bleiben diese Identitäten einfache Identitäten, rein mathematische Relationen. Es ist der „geteilte" räumliche und zeitliche Charakter jener vier Relationen, der sie zu rein mathematischen Relationen macht, wenn von den „verschmolzenen" vierdimensionalen Eigenschaften die Rede ist, also beispielsweise von der Krümmung.

Anders steht es mit dem Energie-Impuls-Tensor. Hier haben die „geteilten" Eigenschaften des Raumes und der Zeit (die Homogenität beider) physikalischen Sinn. Sie stellen physikalische Gesetze dar. Die Homogenität des Raumes drückt sich durch die drei skalaren Gleichungen der Erhaltung der Impulskomponenten aus. Die Homogenität der Zeit äußert sich in der Gleichung für die Erhaltung der Energie.

Warum sind diese vier Erhaltungsgesetze, die für alle physikalischen Erscheinungen gelten (mechanische, elektromagnetische, nukleare), gerade mit der

Gravitation verknüpft? Dazu erinnern wir uns daran, daß in der allgemeinen Relativitätstheorie das Gravitationsgesetz einerseits den Zusammenhang zwischen allen Körperschwerpunkten und den Feldern und andererseits Eigenschaften des Raumes und der Zeit charakterisiert. Hieraus werden die Gesetze für das Verhalten der Massenschwerpunkte in Raum und Zeit abgeleitet, in erster Linie die Impuls- und Energieerhaltungssätze. Die allgemeine Relativitätstheorie betrachtet diese vier Erhaltungssätze als vier Aspekte der einheitlichen invarianten absoluten vierdimensionalen Krümmung der Welt.

Wenn die vier genannten Erhaltungssätze physikalische Äquivalente der Beziehungen zwischen den Komponenten des Krümmungstensors sind, was ist dann das physikalische Äquivalent der Krümmung selbst? Die Krümmung stellt die geometrische Grundeigenschaft des Raumzeitkontinuums dar. Sie erst macht es zu einem *physikalischen* Kontinuum, sie liegt der physikalischen Geometrie zugrunde. Das physikalische Äquivalent zur Krümmung ist eine physikalische Grundeigenschaft des Stoffes, die die gekrümmte Raumzeit als Funktion des Stoffes ausdrückt. Es ist dies die *Wirkung*, das Produkt aus Energie und Zeit. Die Wirkung ist das *Maß* der *vierdimensionalen* Grundeigenschaft des Stoffes, sie hat zur vierdimensionalen Welt die gleiche Beziehung wie die Energie zum dreidimensionalen Raum.[6] Wenn man ein Bild der mittleren kontinuierlichen Materieverteilung im Raum entwirft, so stellt die örtliche Fundamentalgröße die Massendichte dar, und die Grundgröße, die ein gegebenes endliches Gebiet charakterisiert, die Masse beziehungsweise die Energie. Will man die Verteilung und das Verhalten des Stoffes in der vierdimensionalen Welt charakterisieren, so wird die Grundgröße das Produkt aus Energiedichte und vierdimensionalem Volumen sein. Und dies ist die Wirkung.

Die Genesis und die Entwicklung der Begriffe der Wirkung und der Variationsprinzipien in der klassischen Physik und ihre Rolle in der Relativitätstheorie zeigen deren Verwurzelung in der Physik des 19. Jahrhunderts. Eddington hat recht, wenn er sagt, daß Wirkung und Entropie die einzigen klassischen Begriffe sind, die die relativistische Physik ohne prinzipielle Beschränkungen beibehalten hat.[7]

Die Relativitätstheorie erlaubt, eine viel diskutierte, wesentliche Seite des Prinzips der kleinsten Wirkung erschöpfend aufzuklären.[8]

Die Wirkung nach Hamilton (das Zeitintegral der Differenz von kinetischer und potentieller Energie) ist gegenüber der Wirkung nach Lagrange (Zeitintegral über die kinetische Energie) lorentzinvariant. Darin drückt sich die vierdimensionale Natur der Wirkung nach Hamilton aus. Die Größen, die den Zustand eines materiellen Systems in einem bestimmten Moment charakterisieren, stellen eine

[6] Vgl. A. Eddington, Raum, Zeit und Schwere, Braunschweig 1923, S. 152—153.

[7] „Die kommende Relativitätstheorie hat ihre Schatten vorausgeworfen, denn die Physik war schon zu zwei großen Verallgemeinerungen bereit: dem Prinzip der kleinsten Wirkung und dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik oder dem Prinzip vom Maximum der Entropie" (ebenda, S. 153).

[8] Vgl. M. Planck, Das Prinzip der kleinsten Wirkung, in: M. Planck, Vorträge und Erinnerungen, Stuttgart 1949, S. 103—104.

dreidimensionale Projektion eines vierdimensionalen Objektes dar und ändern sich in Abhängigkeit von der Wahl des raumhaften Schnittes durch die vierdimensionale Welt. Die Größen, die das Verhalten eines Systems während eines endlichen Zeitabschnittes charakterisieren, können unter gewissen Umständen von solcher Auswahl unabhängig sein. Gehen wir bei der Bestimmung des Systemzustandes für einen gegebenen Moment von seinem Verhalten während eines endlichen Zeitabschnittes aus, der sowohl Vergangenheit wie Zukunft enthält, so steckt hierin keine Spur von Teleologie. Eine derartige Aufgabe unterscheidet sich im Prinzip nicht von einer anderen, bei der Erscheinungen in einem Raumpunkt durch Erscheinungen in einem anderen Raumpunkt determiniert werden. Die Gleichberechtigung von Raum und Zeit in der Relativitätstheorie hebt die Frage nach einer „zielstrebig wirkenden Natur" auf, die in der Geschichte des Prinzips der kleinsten Wirkung eine große Rolle gespielt hat. Um die Größe der Wirkung eines Systems auszurechnen, muß man den Raum, den der zum System gehörende Körper einnimmt, über die Zeit integrieren. Dann erhalten wir eine vierdimensionale lorentzinvariante Größe.

Auf Grund solcher Überlegungen nimmt nach Meinung Plancks das Prinzip der kleinsten Wirkung für alle vier Weltkoordinaten eine symmetrische Form an. Es ist das Zentralprinzip, dessen Projektion in den Raum die drei Erhaltungssätze für die Impulskomponenten und dessen Projektion in die Zeit den Energieerhaltungssatz liefert.[9]

Die Relativitätstheorie interpretiert dieses Prinzip, angewandt auf Ereignisse, als ein Prinzip, das wirkliche Weltlinien von bloß möglichen zu unterscheiden erlaubt. Insofern die Wirkung das Maß der Krümmung der vierdimensionalen Welt ist, bedeutet die kleinste Wirkung, daß die tatsächlichen Weltlinien mit denen geringster Krümmung, mit geodätischen Linien, zusammenfallen.

Der Versuch einer tiefer reichenden Synthese der relativistischen und Quantenideen führt zu dem Gedanken, daß das Prinzip der kleinsten Wirkung und der kleinsten Krümmung statistischer Natur sein kann. Eddington hatte, wie schon erwähnt, 1920 auf die Unabhängigkeit des Wirkungsbegriffes vom Maßstab hingewiesen. Eddington vermutete, die Wirkung sei eine Funktion der Wahrscheinlichkeit. Aber wenn man die Wahrscheinlichkeit multipliziert, so addieren sich die entsprechenden Wirkungen nur. Hieraus folgt, daß die Wirkung proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit sein müßte. Da der Wahrscheinlichkeitslogarithmus eine negative Zahl ist, müßte man die Wirkung als Logarithmus der Wahrscheinlichkeit mit negativem Vorzeichen betrachten. In diesem Fall bedeutet das Prinzip der kleinsten Wirkung die größte Wahrscheinlichkeit für eine faktisch verwirklichte Bewegung. Die Quantenmechanik hat derartige Vorstellungen aussichtsreicher gemacht.

Bei Hamilton war das Prinzip der kleinsten Wirkung eng mit einer optisch-mechanischen Analogie verbunden. Diese forderte, daß das Argument des Cosinus in der Formel der zu betrachtenden Wellenbewegung eine dimensionslose Größe sein muß. Dazu mußte man die Wirkung durch eine Größe dividieren, die selbst

[9] Ebenda, S. 105.

die Dimension einer Wirkung besaß. Eine solche Größe war die von Planck eingeführte Konstante.

In der folgenden Entwicklung der Quantenmechanik blieb die Diskretheit der Wirkung die Ausgangsprämisse. Diese Diskretheit erlaubte, die Struktur der Quantenmechanik zu erklären, blieb aber selbst ungeklärt und spielte daher die Rolle eines Grenzbegriffes der Theorie. Die Diskretheit der Wirkung wird vielleicht einmal eine kausale Erklärung durch weitere Verallgemeinerungen der relativistischen Quantenmechanik erfahren.

Vielleicht wird man einmal die durch Plancks Konstante geteilte Wirkung als die Zahl der raumzeitlichen Zellen auffassen, in denen die elementaren Umwandlungsprozesse auf dem Lichtkegel erfolgen, als die Zahl der Zellen, die in makroskopischer Annäherung als kontinuierliche Weltlinie eines mit sich selbst identischen Elementarteilchens erscheinen. Dann würde das Prinzip der kleinsten Wirkung zum Prinzip der größten Wahrscheinlichkeit. In dieser Richtung verlaufen, wie uns scheint, gewisse Versuche, die Relativitätstheorie statistisch zu erklären und andererseits in die Quantenmechanik den Begriff der *Wahrscheinlichkeit einer Weltlinie* einzuführen. Zu den Arbeiten ersterer Art zählt die von Dirac[10], zu den zweiten die Dissertation Feynmans.[11] Feynman will die wirklichen Weltlinien der Teilchen als die wahrscheinlichsten Weltlinien definieren. Er gelangte im weiteren zu einem teilweisen Verzicht auf eine differentielle Vorstellung von der Bewegung von Punkt zu Punkt und von Augenblick zu Augenblick. An ihre Stelle tritt eine integrale Auffassung, die jeweils einen endlichen Abschnitt betrachtet. Auch hier spielt ein kleinstes vierdimensionales Gebiet eine wesentliche Rolle, innerhalb dessen auf Unterscheidung einzelner Weltpunkte verzichtet wird.

Die heute quer durch die ganze Physik gehenden Tendenzen lassen im Epilog der klassischen Ideen der Homogenität des Raumes und der Zeit und der Anisotropie der Zeit die Konturen unklar und schwankend erscheinen. Dabei wird die Anisotropie der Zeit nicht nur ein Charakteristikum der thermodynamischen Prozesse, sondern auch aller Strukturveränderungen in der Mikro- und Makrowelt.

Je weiter sich die Wissenschaft von den Ergebnissen der klassischen Physik entfernt, um so näher erweist sich ihr diese klassische Wissenschaft als eine Gesamtheit von Fragen und Antinomien, als das „Drama der Ideen", für das Einstein die objektive Wissenschaftsgeschichte ansah; um so näher ist der modernen Forschung der „faustische Geist" der klassischen Wissenschaft, der Geist der endlosen Bemühungen um immer kompliziertere Gesetzmäßigkeiten der Natur, die nicht nur in Raum und Zeit, sondern auch in der unerschöpflichen Kompliziertheit ihrer Gesetze unendlich sind.

[10] Vgl. P. A. M. Dirac, Is there an Aether?, in: Nature (168), 1951, S. 906—907; ders., The Hamiltonian form of field dynamics, in: Canadian Journal of Mathematics, vol. III, 1951, p. 1—23; P. A. M. Dirac, A new classical theory of electrons, in: Proceedings of the Royal Society, vol. A 209, 1951; S. 291; P. A. M. Dirac, A new classical theory of electrons. II, in:, ebenda Series A, Vol. 212, 1952, S. 330; Physica, vol. 19, 1952, S. 888; P. A. M. Dirac, Die Stellung des Äthers in der Physik, in: Naturwissenschaftliche Rundschau, 6 (1953), S. 441—446.

[11] Vgl. R. P. Feynman, The principle of least action in quantum mechanics, Ph. D. thesis, Princeton 1942, in: Review of Mod. Phys., vol. 20, 1948, S. 367.

Einstein ist, wie wir in dem Abschnitt über seine Weltanschauung ausführten, bei der Aneignung und Umarbeitung des traditionellen Rationalismus vom 18. Jahrhundert, das endgültige Lösungen für die Rätsel des Seins angestrebt hatte, auf die elastischeren Ideen des 17. Jahrhunderts zurückgegangen. Diese Rückwendung zu den Quellen war die andere Seite der zuweilen intuitiven, zuweilen ganz scharf formulierten Voraussicht der weiteren, vielleicht unendlichen Modifikationen der Ideen, zu denen Einstein kam. Auch mit seinem tiefen Gefühl, die Morgenröte eines neuen Weltbildes zu erleben, war das 17. Jahrhundert Einstein nahe, denn auch er sah ja in seinen eigenen Beiträgen nur die Morgenröte und den Beginn einen neuen Physik.

Im Jahre 1955, kurz vor seinem Tode, schrieb Einstein an Max von Laue, daß er den Feierlichkeiten anläßlich des 50-Jahr-Jubiläums der Relativitätstheorie fernbleibe, und führte dabei aus: „Alter und Krankheit machen es mir unmöglich, mich bei solchen Gelegenheiten zu beteiligen, und ich muß auch gestehen, daß diese göttliche Fügung für mich auch etwas Befreiendes hat. Denn alles, was irgendwie mit Personenkultus zu tun hat, ist mir immer peinlich gewesen. In diesem Falle ist es um so mehr so, weil es sich hier um eine gedankliche Entwicklung handelt, an der Viele ganz wesentlich beteiligt waren, eine Entwicklung, die weit davon entfernt ist, beendigt zu sein ... Wenn ich in den Grübeleien eines langen Lebens eines gelernt habe, so ist es dies, daß wir von einer tieferen Einsicht in die elementaren Vorgänge viel weiter entfernt sind, als die meisten unserer Zeitgenossen glauben, so daß geräuschvolle Feiern der tatsächlichen Sachlage wenig entsprechen."[12]

Die Erfolge der Relativitätstheorie machten Einstein keineswegs gegenüber den noch ungelösten Problemen blind. Hierzu gehört die Ableitung der Sätze der Relativitätstheorie aus noch allgemeineren Naturgesetzen. Diese Gesetze müßten nicht nur die makroskopischen Beziehungen erklären, die die Relativitätstheorie postuliert, sondern auch die atomistische Struktur des Mikrokosmos. Die Relativitätstheorie behauptet, daß sich Maßstäbe und Uhren in bewegten Systemen auf bestimmte Weise verändern, wodurch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit garantiert wird. Aber wodurch wird das Verhalten der Maßstäbe und Uhren bestimmt? Für die Relativitätstheorie ist ihr Verhalten ein experimentell bestätigtes Ausgangspostulat. Doch die Wissenschaft gibt sich nicht mit rein empirischen Daten als Endgliedern einer Analyse zufrieden, sondern sie sucht nach kausalen Erklärungen der empirischen Konstanten. Gerade darin besteht die nie endende Evolution der Wissenschaft. In seiner autobiographischen Skizze von 1949 schreibt Einstein über die Relativitätstheorie: „... Es fällt auf, daß die Theorie (außer dem vierdimensionalen Raum) zweierlei physikalische Dinge einführt, nämlich 1. Maßstäbe und Uhren, 2. alle sonstigen Dinge, zum Beispiel das

[12] M. von Laue, Eröffnungsansprache der Festsitzung der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin und der Physikalischen Gesellschaft der DDR, am 18. März 1955 in: Physikalische Blätter, Bd. 11 (1955), S. 228, S. 230.

elektromagnetische Feld, den materiellen Punkt usw. Dies ist in gewissem Sinne inkonsequent; Maßstäbe und Uhren müßten eigentlich als Lösungen der Grundgleichungen (Gegenstände, bestehend aus bewegten atomistischen Gebilden) dargestellt werden, nicht als gewissermaßen theoretisch selbständige Wesen."[13]

Aber eine solche Ableitung der relativistischen Beziehungen aus der atomistischen Struktur der Maßstäbe und Uhren bedeutet das Eindringen von Quantenbegriffen in einen Bereich, in dem die Relativitätstheorie nach ihrer Begründung sucht. In seinem Artikel „Bemerkungen zu Einsteins Entwurf einer einheitlichen Feldtheorie" vermerkte Heisenberg, daß vom quantenphysikalischen Standpunkt die Maßstäbe und Uhren komplizierte Körper sind, die aus vielen Elementen bestehen und komplizierten Einwirkungen verschiedener Kraftfelder unterworfen sind. Daher ist es unverständlich, warum gerade ihr Verhalten sich durch besonders einfache Gesetze beschreiben lassen sollte.[14]

Aber gerade in der Quantenmechanik selbst wird auch mit Körpern operiert, deren atomistischer und quantenhafter Feinbau grundsätzlich ignoriert wird. Doch zunächst kehren wir nochmals zu der für die neue Physik so charakteristischen „Programmierung" einer neuen physikalischen Theorie zurück, die unter Berücksichtigung der Forderungen nach „äußerer Bewährung" wie auch nach „innerer Vollkommenheit" die Divergenzen der Eigenenergie und -ladung und andere Aporien der heutigen Quantenfeldtheorie beseitigen soll.

Die konkreten Varianten einer solchen Theorie können einstweilen nicht mehr als die grundsätzliche Erfüllbarkeit dieser oder jener Vorhaben beweisen. Dennoch scheinen einige allgemeine Prognosen durchaus berechtigt, fast eindeutig. Zu ihnen gehört beispielsweise die Vorstellung Dysons[15] von den zwei Weltbildern, deren eines den Hamiltonschen Gleichungen — also der physikalischen Analyse von Moment zu Moment — entspricht, das andere aber einer genaueren Analyse. Das erste Bild ergibt sich einem Beobachter, der Geräte benutzt, deren atomistische Struktur vernachlässigt wird. Die Meßgenauigkeiten sind dabei durch die beiden Konstanten Lichtgeschwindigkeit und Wirkungsquantum eingeschränkt. Einen solchen Beobachter nennt Dyson „ideal". Er braucht sich nicht um die Wechselwirkungen der Felder und die entsprechenden Teilchentransmutationen zu kümmern. Er kann die Feldstärke des separaten Feldes bestimmen, das durch keinerlei andere Felder gestört wird. Daraus ergibt sich die beliebig genaue Bestimmbarkeit von Variablen, natürlich unter Berücksichtigung der Unbestimmtheit der jeweiligen konjugierten Variablen.

Der Beobachter hingegen, den Dyson als „realen" bezeichnet, kann die atomistische Struktur seiner Geräte nicht ignorieren. Daher vermag er sogar eine einzelne Variable eines Teilchens nicht mit beliebiger Genauigkeit zu bestimmen. Vor ihm eröffnen sich die Wechselwirkungen der Felder, und dadurch wird die

[13] Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, hrsg. v. P. A. Schilpp, Stuttgart 1956, S. 22.

[14] W. Heisenberg, Bemerkungen zu Einsteins Entwurf einer einheitlichen Feldtheorie, in: Эйнштейн и развитие физико-математической мысли, Москва 1962, S. 63.

[15] Vgl. F. J. Dyson, The S Matrix in Quantum Electrodynamics, in: Physical Review, Vol. 75, 1949, S. 1736—1755.

Bestimmung der entsprechenden Feldstärke im ungestörten Zustande ausgeschlossen. Der reale Beobachter muß außer der Lichtgeschwindigkeit und der Planckschen Konstante noch mit anderen Größen, den Kopplungskonstanten und den Werten der Teilchenmasse, rechnen.

Wir treffen in der Relativitätstheorie Thesen, die sich geradewegs auf diese für den „realen Beobachter" so wesentlichen Konstanten beziehen. Bekanntlich muß man in allen Fällen relativistischer Geschwindigkeiten die Veränderungen der Maßstäbe und Uhren berücksichtigen, wenn man das Bezugssystem wechselt.

Jetzt können wir die Quantenmechanik historisch einschätzen: Wie ist von den Vorstellungen der Elementarumwandlungen aus die für die nichtrelativistische Quantenmechanik charakteristische Kausalitätsvorstellung zu sehen?

Bekanntlich hat die Quantenmechanik den alten Laplaceschen Determinismus radikaler als die klassische Thermodynamik aufgegeben. Letzere ignoriert die Bewegung der einzelnen Teilchen nur in bestimmten Grenzen und operiert nur bei der Beschreibung des Verhaltens großer Ensembles mit statistischen Gesetzmäßigkeiten. Die Quantenmechanik läßt dem Laplaceschen Determinismus sogar hinter den Kulissen keinen Platz, denn auch die Zustände der einzelnen Teilchen sind in ihr statistisch bestimmt.

Doch war der Verzicht auf ein System absolut genauer dynamischer Gesetzmäßigkeiten nicht so radikal, wie es früher schien. Die Quantenmechanik wird ohne die Begriffe der klassischen Mechanik sinnlos, die Unbestimmtheit der Variablen verliert ohne die Bestimmtheit anderer Variablen ihren Sinn. Genauso verliert die Möglichkeit, von einer Diracschen „Darstellung" zu einer anderen überzugehen, ohne den Begriff der Darstellung, das heißt einer Reihe genauer Werte für eine der konjugierten Variablen, ihren Sinn. Schließlich wird die Quantenwahrscheinlichkeit ohne Angabe des bestimmten und sicheren Zustandes sinnlos, der diese oder jene Wahrscheinlichkeit besitzen kann. Worin bestehen sicher bestimmte Ereignisse, deren Wahrscheinlichkeiten im allgemeinen Fall einer Wellenfunktion entsprechen? Sie bilden ein bestimmtes *raumzeitliches* Bild, dem Größen entsprechen, welche ihrerseits Raum, Zeit und die Beziehung eines differentiellen Raumabschnittes zu einem differentiellen Zeitabschnitt bestimmen. Unter Benutzung relativistischer Begriffe könnte man von bestimmten Weltlinien sprechen.

Eine solche Vorstellung besagt, daß dem Weltbild die Translation mit sich selbst identischer Objekte, das heißt die aristotelische *φορά*, zugrunde liegt.

Translation bedeutet Verweilen des Teilchens in einander folgenden Raumpunkten und Zeitmomenten. Bei genau bestimmter Geschwindigkeit kann man nur von der Wahrscheinlichkeit sprechen, daß ein Teilchen in jedem Bahnpunkt vorliegt. Aber es geht hier nicht um die Wahrscheinlichkeit des *Vorliegens*, das heißt, des räumlich-zeitlichen Bildes. Der Grund des Weltbildes ist wie zuvor die aristotelische *φορά*, doch bestimmt sind nur die Wahrscheinlichkeiten der die *φορά* beschreibenden Größen. Bohrs Antwort auf die Frage nach den der Welt zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten war völlig exakt: Dem Weltgebäude liegen die statistischen Gesetzmäßigkeiten der Mikrowelt zugrunde. „Gott würfelt." Diese Antwort hatte physikalischen Gehalt, sie war durch viele Beobachtungen

bestätigt, und im Prinzip konnte sie in allen Fällen durch Beobachtungen geprüft werden.

Einsteins Antwort war nicht eindeutig, weil negativ: „Gott würfelt nicht.“ Die statistischen Gesetzmäßigkeiten des Mikrokosmos sind nicht die Fundamentalgesetze der Welt. Bedeutet das, daß es Gesetzmäßigkeiten gibt, die genau und sicher die *φορά* des Aristoteles in allen Punkten quantitativ festlegen? Bedeutet — anders ausgedrückt — Einsteins Antwort die Anerkennung verborgener Parameter für die dynamischen Variablen? Oder bedeutet diese Antwort etwas ganz anderes, nämlich, daß hinter den statistisch bestimmten Veränderlichen Gesetzmäßigkeiten völlig anderer Prozesse stehen, die nicht auf die *φορά* reduzierbar, Prozesse, die überhaupt nicht durch Koordinaten und Geschwindigkeiten beschreibbar sind?

Als man erstmalig die Beziehungen zwischen Quantenmechanik und Kausalität diskutierte, konnte letztere Variante noch nicht in eine konkrete physikalische Theorie umgesetzt werden. Die relativistische Quantenmechanik entstand erst Ende der zwanziger Jahre, der Begriff der Teilchenumwandlung noch später und, was das Wichtigste ist: Die relativistische Theorie erreichte keine logische Geschlossenheit, sie löste Sonderfälle, erhielt keine durchgehende relativistische Form und führte zu schweren Widersprüchen. Die zweite Antwort kann auch heute *noch nicht* in einer *eindeutigen* Theorie gegeben werden, aber hypothetische Schemata demonstrieren schon jetzt die prinzipielle Möglichkeit, diese Antwort physikalisch konkret zu dechiffrieren.

Daher erscheinen die Diskussionen der späten zwanziger Jahre wenn nicht archaisch, so doch jedenfalls zur Geschichte gehörend. Im Zentrum der Aufmerksamkeit standen damals und auch später Prozesse, bei denen man die relativistischen Quanteneffekte der Feldwechselwirkungen und der Teilchenumwandlungen vernachlässigen konnte.

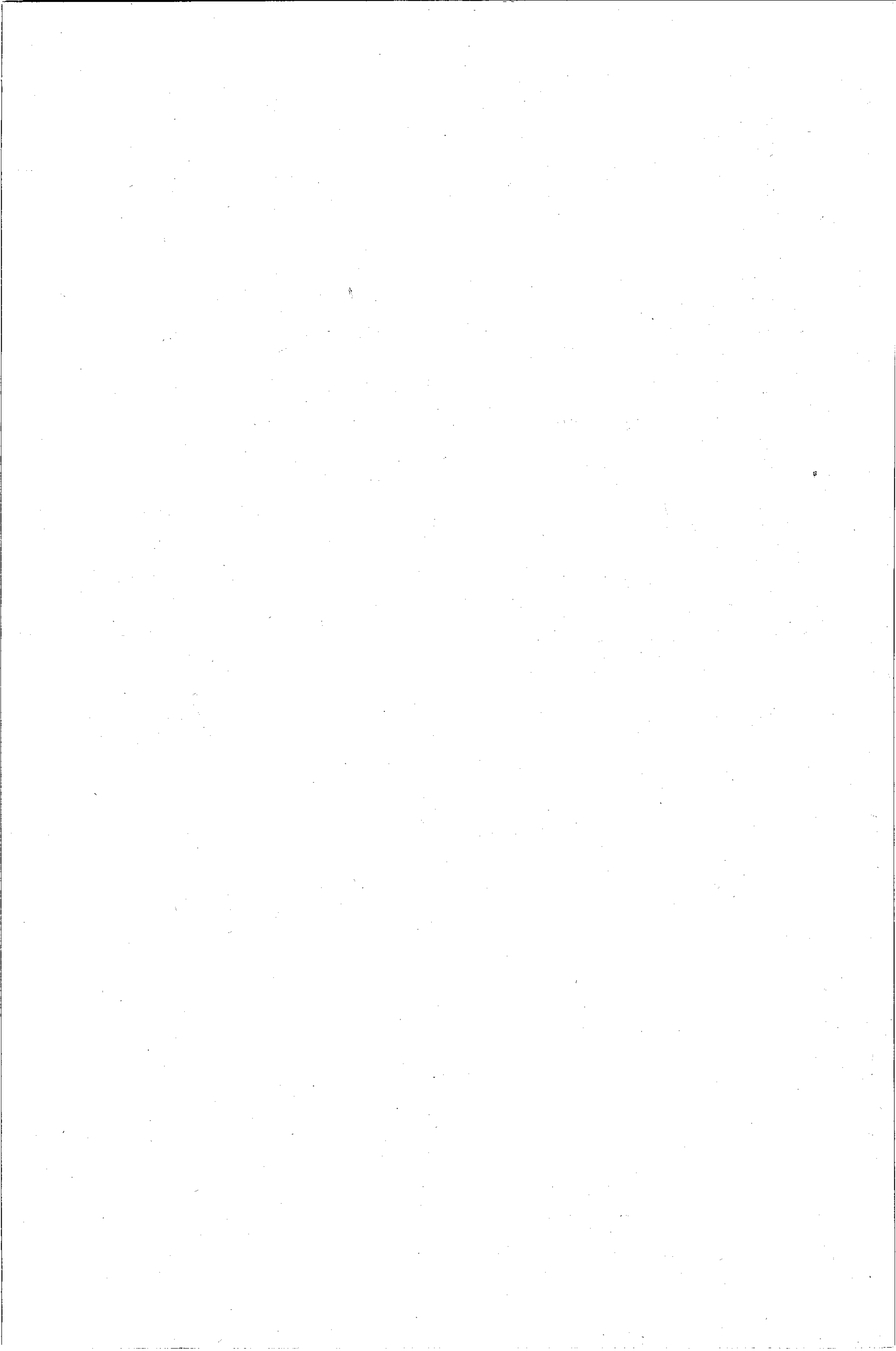
Nur diese Prozesse konnte die relativ abgeschlossene, nichtrelativistische Quantenmechanik erklären. Die Position Bohrs im Streit mit Einstein war physikalisch äußerst konkret, weil sie auf dieser Theorie fußte und über sie nicht hinausging.

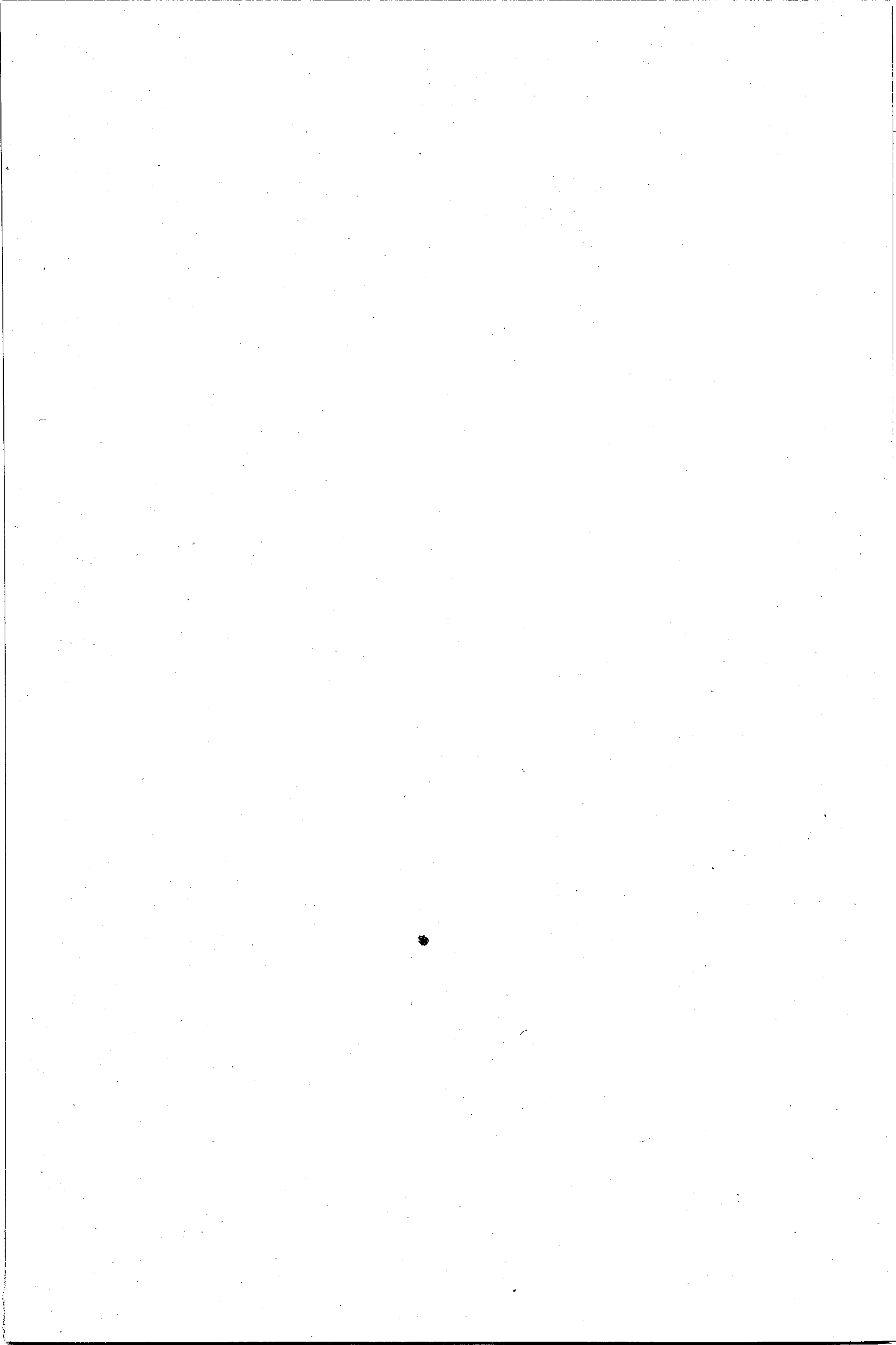
Einsteins Position war rein intuitiv, aber diese Intuition erwies sich als der Zukunft zugewandt. Schon seit 1930 konnte man sagen, daß der statistische Determinismus das allgemeine Kausalitätsprinzip nicht ins Schwanken bringt. Aber jetzt kann man sich eine allgemeine Form des Determinismus vorstellen und zugleich den wahren Sinn der verschiedenen Interpretationen der nichtrelativistischen Quantenmechanik erkennen.

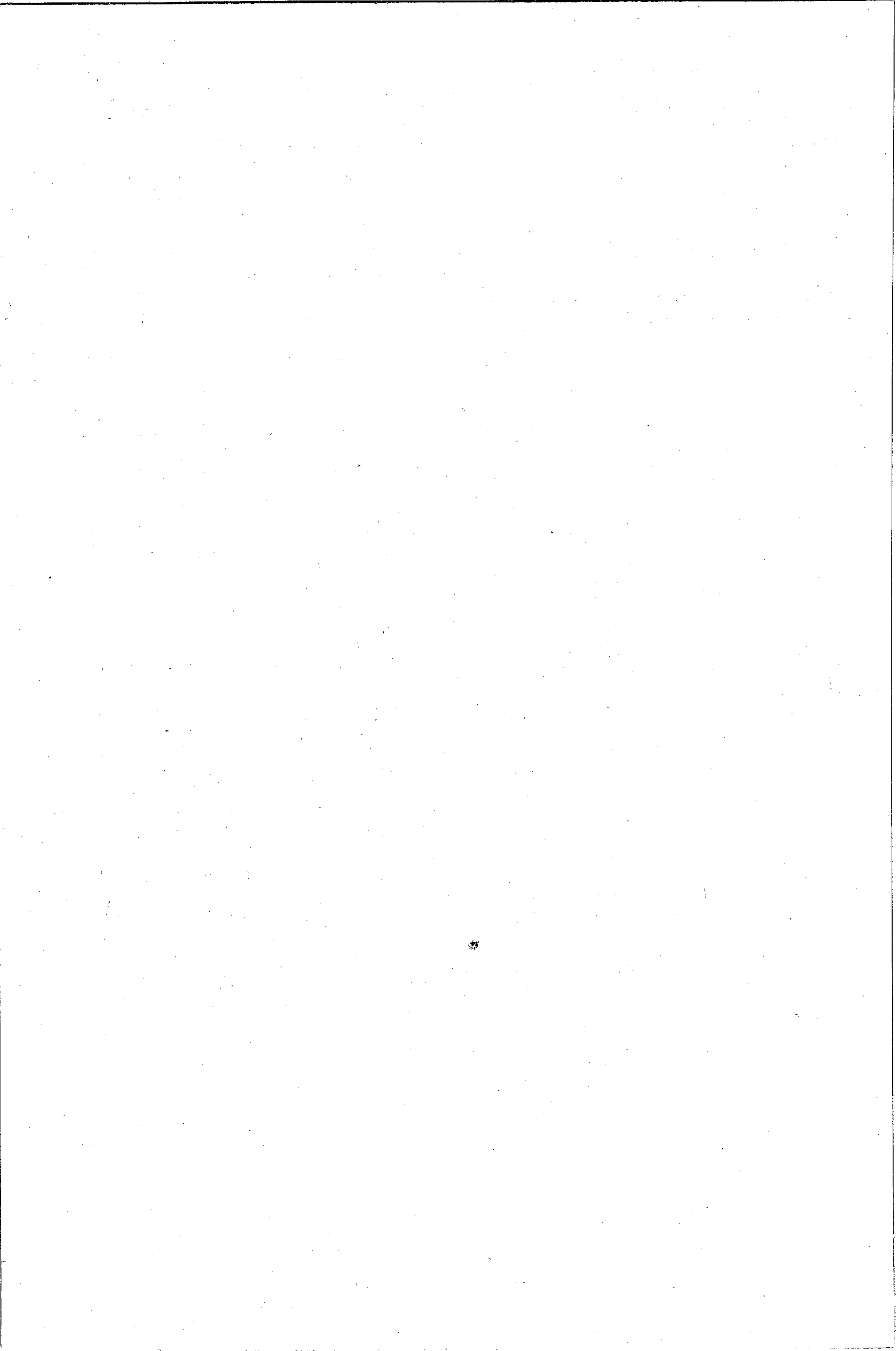
Seit dem 17. Jahrhundert entwickelte sich das Kausalitätsprinzip in Form einer Reihe von Erhaltungsgesetzen, denen verschiedene Homogenitätskonzeptionen entsprachen: Homogenität des Raumes, der Zeit, der ebenen und später der gekrümmten Raumzeit.

Daher beruht die Kontinuität der Physik von Galilei bis zu den neuesten physikalischen Tendenzen auf der Existenz einer durchgängigen Idee, die Subjekt historischer Modifikationen ist. Soweit sich die angeführten Tendenzen im gewissen Sinn in der genialen Intuition Einsteins verkörpern, haben wir Grund, von der Homogenität als der Leitidee der Entwicklung der Physik von Galilei bis Einstein zu sprechen.

PERSONENVERZEICHNIS







Kuznecov VON GALILEI BIS EINSTEIN